

Reseña

La ciencia, tal y como la entendemos hoy, comenzó con la experimentación, aliada con la generalización de los datos concretos obtenidos a través de esta.

Pero la ciencia trata de muy diversos ámbitos, que van de lo general (el universo) a lo particular (moléculas, células, etc.): a lo largo de sus capítulos, este libro desarrolla la historia de cada uno de esos ámbitos; su trayectoria e importancia en el pasado y su vigencia en el presente.

Índice

Prólogo

Introducción

1. Filósofos, médicos y cirujanos, astrónomos y naturalistas. Observar la naturaleza
2. Haciendo números, elaborando teorías. La especulación
3. El camino hacia la revolución científica. Verificarlo todo
4. La revolución científica. Todo se observa, todo se mide
5. Partículas, fuerzas y energía. Newton a la conquista del continente
6. Nuevas herramientas de cálculo. Las matemáticas más allá del número
7. Líquido, sólido, gaseoso. De la alquimia a la química
8. El carbono, principio de vida
9. Dominar a Prometeo. El calor
10. Magnetismo y electricidad. El secreto del ámbar
11. La luz, mágica emanación
12. Radiaciones, energías invisibles
13. La mayoría de edad de la matemática o la tenue frontera entre lo abstracto y lo real
14. Todo es relativo: Einstein
15. Misteriosas partículas. Un mundo cuántico
16. Del caos al orden. El estudio del Universo
17. Un planeta que respira: el hábitat de la vida
18. La célula es la vida
19. Moléculas y origen de la vida: de Mendel a Dolly
20. Evolucionismo. Descendientes de una forma primordial
21. De barberos y cirujanos. Salud y enfermedad

Prólogo

La ciencia, y su hermana, la tecnología, penetran en prácticamente todos los recovecos de la vida. No es posible comprender ni nuestros propios cuerpos, que no son, en última instancia, sino química, biología y física en movimiento, ni el escenario —el Universo, y dentro de él ese pequeño planeta al que llamamos Tierra— en el que tiene lugar nuestra existencia sin recurrir al conocimiento que ofrece la ciencia, una habilidad humana que, además, nos ha ido proporcionando cada vez más instrumentos —es lo que denominamos «tecnología»— para ser algo más que indefensos y objetivos espectadores de los fenómenos naturales. Es por esto por lo que resulta no ya conveniente, sino imprescindible, poseer al menos unos conocimientos básicos sobre la ciencia: acerca de su estado actual y de cómo ha llegado a ser lo que es. Ajenos a tales conocimientos, somos como trozos de madera que flotan en oscuros océanos sin ser capaces de dirigirnos a lugar alguno ni comprender qué es lo que nos está sucediendo.

Este libro, fruto de la colaboración de un historiador «general» y de un historiador de la ciencia, pretende ayudar a subsanar semejante carencia, suministrando a sus lectores una visión lo más básica y completa posible de ésta. Aunque prestamos especial atención al camino —es decir, a su historia— que ha seguido la ciencia para ser lo que es hoy, hemos organizado nuestra presentación de la manera más lógica posible, comenzando por sus fundamentos, por las construcciones teóricas sobre las que se apoya el, por decirlo de alguna manera, «funcionamiento de la maquinaria del Cosmos», hasta llegar a productos más contingentes, como es, por ejemplo, la vida en un pequeño planeta de un sistema solar de una de las, a efectos contables, prácticamente infinitas galaxias que pueblan el Universo.

Es obligado señalar que este libro debe bastante a uno previo de los autores, *Los pilares de la ciencia* (Espasa, 2012), pero no es un mero resumen de él. Su estructura se ha reorganizado y sus contenidos han sido simplificados y completados, añadiendo no pocas secciones nuevas. Todo con el propósito de poner a disposición de los lectores «lo que hay que saber» de la ciencia, lo realmente

imprescindible, al menos según nuestro criterio. Ojalá lo hayamos conseguido.

Introducción

La naturaleza, del latín *natura*, incluye todo aquello que existe sin más participación humana que la de dar nombre a las cosas —el Sol, la Tierra, el aire, el agua...—, a sus propiedades —movimiento, peso, color, sabor...—, a los seres vivos —plantas y animales— y a sus elementos —átomos, células, moléculas.

La formación del Universo comenzó hace 13.798 millones de años (M. a.) con el *Big Bang* y la subsiguiente expansión cósmica. No habían pasado 1.000 M. a. cuando se formaron las primeras aglomeraciones globulares en medio de las estrellas, nubes de hidrógeno y materia oscura, que dieron lugar a la Vía Láctea, la galaxia en la que se encuentra nuestro Sistema Solar. La Vía Láctea es un disco plano de más de 100.000 años luz de diámetro que gira en espiral, compuesto por un número incontable de estrellas, entre 100.000 y 400.000 millones, y un número aún mayor de planetas, exoplanetas que el desarrollo tecnológico está permitiendo comenzar a identificar. Hace alrededor de 4.500 M. a. el colapso de una nube molecular dio origen al Sistema Solar, compuesto por planetas que giran alrededor del Sol. Las rocas más antiguas de la corteza terrestre tienen una antigüedad de unos 3.800 M. a. El origen de la vida se sitúa a partir de alrededor de 3.700 M. a. Los primeros seres unicelulares, las bacterias, se hicieron visibles mediante la agregación en forma de extrematolitos y su historia se escribió mediante los restos fósiles que han sobrevivido. La explosión cámbrica (547-488 M. a.) provocó el surgimiento de gran número de especies. El orden de los primates apareció hace 65 M. a., la familia de los homínidos divergió hace 3, 5 M. a.; entre ellos se cuentan los *australopitecos*, a los que pertenece la famosa Lucy. De hace alrededor de 2, 5 M. a. datan los primeros fósiles del género *Homo*, cuya especie más antigua se conoce como *Homo habilis* por el parecido con los modernos y por la abundancia de herramientas y armas de piedra que se encontraron junto a sus restos.

Al hablar de los productos realizados por los humanos entramos en el ámbito de la cultura, una de las creaciones más características de la especie humana. Incluye la técnica, que transformó la materia de la Tierra, la ciencia, que proporcionó el

conocimiento de la naturaleza, y la política, que organizó la sociedad y las formas del poder e inventó las manifestaciones artísticas: literatura, pintura, música.

La cultura de Olduwai es la primera muestra de la capacidad técnica de los recién llegados, que repitieron las mismas formas sin mejorarla: el bifaz, trabajado por ambas caras, para producir filos cortantes. Coincide con la aparición de una nueva especie con una capacidad craneana (850 cm³) que dobla la de sus antecesores, el *Homo erectus* (de hace entre 1, 7 y 0, 3 M. a.), que convivió con los anteriores durante medio millón de años y se extendió por todo el continente africano, el sur de Europa y Asia. El *Homo sapiens* apareció en África hace unos 200.000 años y una subespecie, conocida como hombre de Cromañón, manifestó su capacidad simbólica en las cuevas. La revolución neolítica (10.000 a 5.000 años) se caracterizó por la domesticación de las plantas y los animales, la aparición de la agricultura y la conversión de las bandas de cazadores en grupos de campesinos que construyeron las primeras ciudades para protegerse de las alimañas y almacenar los granos.

La primera actividad cultural del *Homo habilis* se limitó a la transformación de la materia para crear armas y herramientas de piedra. Organizados en bandas de cazadores-recolectores, se extendieron por los tres continentes entre 50.000 y 10.000 años antes de Cristo. El arco, un instrumento de caza y un arma de propulsión, les acompañó en sus movimientos y desde 20000 a. C. las flechas llevaban una punta de piedra. En un abrigo de Tassili se conserva la imagen de un arquero con su carcaj, de 7500 a. C. La revolución neolítica extendió la domesticación a los lobos y las ovejas hacia 6500 a. C., continuó con la del ganado mayor y la de los caballos en torno a 4000 a. C. La domesticación de las plantas — trigo hacia el 7000, cebada en el 5000, patatas en Perú y Bolivia en el 4400 (siempre a. C.)—, el aumento de la producción y la multiplicación de la población se reflejaron en la importancia de los asentamientos. Jericó, la antigua ciudad cisjordana, se levantó 7.000 años antes de Cristo, y esta forma de vida se generalizó a partir de 5500 a. C. Las herramientas que requerían mayor fuerza que la de un hombre para su funcionamiento favorecieron el aprovechamiento de la fuerza

animal. El arado ligero necesitaba dos personas: una para tirar de él y otra para guiarlo, hasta que la domesticación de los animales de tiro permitió prescindir de la primera. Cuando el agua no llegaba del cielo, se extraía de un pozo mediante el uso de un cigüeñal (2500 a. C.) o de una noria, descrita en una tablilla babilónica de 700 a. C. La noria permitió la irrigación de los huertos, en tanto la de los campos requería el uso de canales, de los que se conservan restos de hace 3.600 años. La invención de la rueda del alfarero hizo posible fabricar recipientes de distintas formas y tamaños, destinados al almacenamiento del agua, los granos y las harinas, mientras que la construcción de hornos cubiertos permitió aumentar la temperatura de la combustión hasta los 1.000 grados (3.500 años antes de Cristo) para la fabricación de ladrillos, cuyas proporciones (4:2:1) son las más adecuadas para la estabilidad de la construcción. El bronce, la aleación del cobre y el estaño, mucho más duro que el primero de sus componentes, tenía toda clase de usos, entre ellos la fabricación de armas y de ruedas. Apareció en las costas del Egeo, en la divisoria del cuarto al tercer milenio en el Próximo Oriente, y mediado éste tuvo un gran desarrollo en el valle del Indo. El carro sumerio con ruedas macizas de madera se documenta en el Estandarte de Ur, en el entorno de 2.500 años antes de Cristo, y el carro de guerra con radios aparece en las réplicas de los enterramientos en Kazajstán hacia el 2000 a. C. Sin embargo, el coste del bronce limitaba su empleo y fue sustituido, salvo en los usos suntuarios, por el hierro (1400 a. C.). Los hititas guardaron el secreto de la producción hasta el siglo XI a. C., para mantener su superioridad militar. La navegación planteó problemas de todo tipo: flotabilidad, propulsión y dirección. Las cuatro grandes aportaciones de la China antigua fueron la aguja magnética, la pólvora, el papel y la imprenta, novedades técnicas a las que habría que añadir el ábaco para realizar cálculos.

Las maquinas simples son artefactos destinados a multiplicar la fuerza aplicada. Eran seis: la palanca para desplazar los cuerpos, el plano inclinado para facilitar la carga y descarga, la cuña para dividir los troncos, la polea para levantar y bajar cargas, el tornillo para subir el agua y la asociación del eje y la rueda para transportar cargas.

La más potente de las técnicas fue la invención del lenguaje, que proporcionó a los humanos la capacidad de expresar sus pensamientos y manifestar su voluntad, gracias a un cambio en el sistema de fonación de los *sapiens*: el descenso de la laringe, que les permitió vocalizar. En un primer momento, hubo un signo para cada cosa o concepto, constituían una unidad de significado y la asociación de dos o más signos era el medio más económico de mejorar la comunicación. Los sumerios asociaron los pictogramas para «boca» y «agua» para referirse a la acción de beber. Más adelante los signos pasaron a denotar las unidades fonéticas. La sílaba es la unidad fónica, y buen número de las palabras sumerias eran monosílabos, lo que exigía una gran cantidad de caracteres: 2.000 a mediados del IV milenio a. C. y entre 500 y 600 en el III milenio a. C. En Egipto tenían 732 signos. La introducción del alfabeto, reducido a dos docenas de letras y sonidos, facilitó el aprendizaje de la lectura y aumentó las dimensiones del vocabulario a costa de multiplicar los polisílabos. Hacia el 2700 a. C. los egipcios habían desarrollado 22 signos jeroglíficos que correspondían a las consonantes. Fue la fuente del alfabeto consonántico fenicio, del que proceden el indio antiguo, el arameo, el griego arcaico y sus derivados: el sanscrito del primero, el árabe y el hebreo del segundo, y el griego, que introdujo letras para las vocales, el eslavo y el romano del tercero. Desde un punto de vista léxico, la palabra es la unidad mínima de sentido, aunque el mismo signo puede tener distintos significados (acepciones) y puede haber distintos signos para el mismo significado. El lenguaje permitió la comunicación oral de las personas vecinas y la escritura con las lejanas en el espacio y en el tiempo, y, por medio de la traducción, con los que hablaban otras lenguas. Sin el lenguaje no habría habido lugar para el conocimiento. Además de servir para la comunicación social, que en sus orígenes pudo limitarse a un corto número de palabras, el lenguaje es necesario para que la actividad mental produzca el pensamiento. Con el lenguaje los humanos se encontraron en disposición de pensar y de comunicar sus ideas. Del III milenio a. C. datan los escritos más antiguos: listas de los reyes de Egipto y de Súmer, registros mercantiles, observaciones astronómicas y noticias médicas. La organización social, el ejercicio

regulado del poder y la creación artística son manifestaciones fundamentales de la cultura.

La observación es la contemplación de las cosas y los seres vivos, las manifestaciones fundamentales de la naturaleza, para identificar los aspectos comunes, los caracteres que permiten considerarlos como elementos de un conjunto: la figura plana y cerrada formada por tres lados es un triángulo, cualquiera que sea su tamaño y forma. Un animal se definía inicialmente por su composición: así, los que compartían las partes del cuerpo, cabeza, tronco y extremidades, pertenecían a un grupo determinado, en tanto que ser grande o pequeño era irrelevante a efectos de su identificación. La observación se limita a caracterizar las propiedades de los distintos grupos. La definición de un objeto, sea una cosa o un ser vivo, requiere identificar un conjunto suficiente de propiedades. Los diccionarios explican el significado de las palabras mediante la descripción detallada de las propiedades. Por ejemplo, la edición de 1817 del Diccionario de la Real Academia Española describía a los peces así:

animales que solo pueden vivir en el agua [...]. Tienen en la cabeza formando con el cuerpo una sola pieza; en lugar de pies unos cuerpos conocidos con el nombre de aletas [...]. Respiran mediante unas aberturas colocadas al arranque de la cabeza, conocidas en la mayor parte de ellos con el nombre de agallas, por donde arrojan el agua que tragan por la boca [...]. La mayor parte de ellos tienen el cuerpo cubierto de pequeñas láminas empizarradas, conocidas con el nombre de escamas [...]. Tienen la sangre roja y fría; los órganos de la generación ocultos y en casi todas las especies las hembras fecundadas por los machos ponen huevos que, fecundados de nuevo por estos se avivan de suyo dentro del agua.

La definición del agua era más breve, aunque las propiedades no escaseaban: «sustancia en su estado más común fluida, elástica, trasparente, insípida y sin olor». La observación continuada o repetida a intervalos permite apreciar los cambios acaecidos en el intervalo, fenómenos como el movimiento o la generación, cuyo

conocimiento requiere una construcción teórica. Durante milenios la observación se realizó a simple vista y las limitaciones de ésta sólo podían superarse mediante la descomposición de las cosas por los alquimistas y la división de los seres vivos por los anatomistas para definir sus distintas partes. Los individuos de la especie humana más reciente, los anatómicamente modernos, son los únicos animales capaces de observar para adquirir un conocimiento de la naturaleza (ciencia), mediante la identificación de las propiedades y el descubrimiento de sus funciones. Compartían con otras especies animales ciertos órganos, aunque sus facultades eran distintas. Los cinco sentidos se encuentran en muchas especies, y ninguna es superior a las otras en todas las funciones. La evolución progresiva del cerebro en términos de volumen, peso (1, 2 kg) y conexiones (cien trillones) es la única variable en que los humanos superaron siempre a los animales. Los anatómicos de la Antigüedad se plantearon la cuestión de cuál de los órganos era el más importante para las funciones del individuo. Aristóteles optó por el corazón, el primero en formarse, la fuente del pensamiento y la sensación, y Galeno apoyó esta creencia. Es habitual referirse a los cinco sentidos como el origen de las sensaciones y el conocimiento. El cuerpo humano es consciente además de otras sensaciones, como el calor y el frío, el movimiento y el reposo, la luz y la oscuridad. La luz es un fenómeno físico, en tanto la visión es una facultad del organismo que convierte las sensaciones en percepciones. Es una forma de energía procedente del Sol y las estrellas que reflejan los planetas y satélites. La luz-radiación envuelve el Universo y en la incapacidad de medir la velocidad de la luz hubo un momento en que se creyó que era instantánea. Para explicar su movimiento se concibió como rayos aislados y Fermat definió su camino como el más rápido para alcanzar su destino. Por otra parte, se observaron fenómenos como la reflexión y la refracción. Los impulsos lumínicos generan sensaciones en cien millones de fotorreceptores (bastones y conos) que componen la retina y se comunican mediante impulsos eléctricos con el córtex del cerebro a través del nervio óptico, compuesto por un millón de filamentos nerviosos que dan lugar a la percepción. Una misma sensación puede generar dos percepciones distintas en el

cerebro, como el cubo de Necker (1832) o el vaso de Rubin (1915). La percepción del espacio proporciona informaciones tales como la distancia o la profundidad, mientras que la percepción de las cosas en el espacio requirió la concepción del espacio tridimensional, que permite describir posiciones como delante y detrás, arriba y abajo, derecha e izquierda. La percepción de los fenómenos en el tiempo se creó a partir de los conceptos de pasado, presente y futuro, en tanto que la duración es una magnitud. El conocimiento de las propiedades permite la identificación de los objetos del mismo género, como los triángulos, y de la misma especie, como los perros, y la clasificación de la realidad en virtud de las propiedades comunes.

Además de las propiedades, la observación ofrece otro tipo de conocimiento, el de las magnitudes (que acabamos de mencionar), que se caracterizan por una propiedad común: el carácter mensurable de los objetos, sean cosas o seres vivos. La longitud, el área, el volumen, el peso, la masa, el tiempo o el calor son algunas de las más conocidas. Para medirlas se requerían dos cosas:

1. crear las unidades adecuadas para cada magnitud: la longitud y las dimensiones —hay unidades pequeñas, como las menores del metro, medianas, como las millas, y grandes, como los años luz—; y
2. construir instrumentos adecuados para cada caso. Las magnitudes del cielo y las de la Tierra eran tan diferentes que las unidades de medida fueron distintas: naturales unas y arbitrarias otras.

La aparición sucesiva del Sol en el cielo determinó la duración del día, en tanto el regreso del Sol al punto de partida duraba un año. Las unidades terrestres fueron creaciones arbitrarias. La normalización de las partes del cuerpo humano proporcionó las primeras unidades: codo, palmo, dedo, paso. Aunque las grandes distancias se expresaban en estadios, se medían en pasos: la longitud del estadio equivalía a 600 pasos, la longitud del estadio de Olimpia. En el mar se usaban una cuerda de nudos y un reloj de arena que se vaciaba en un tiempo conocido. La construcción de balanzas —y la más sencilla pero limitada, la romana— permitía conocer el peso al alcanzarse la posición de equilibrio entre sus dos platos. Se

usaban múltiplos y divisores para simplificar el cálculo. La exactitud de las medidas determinó un proceso de perfeccionamiento que continúa en nuestros días. Protágoras de Abdera (siglo V a. C.) expresó su satisfacción ante el hecho de que los miembros del cuerpo humano hubieran servido para medir las magnitudes naturales y de que fuese el hombre el autor de la medida, al mantener que «el hombre es la medida de todas las cosas».

Aristóteles describió el cambio como el paso de la potencia al acto y distinguió cuatro formas posibles: de sustancia, de cantidad, de calidad y de lugar. Este último correspondía al fenómeno del movimiento, al que dedicó especial atención. La teoría de los cuatro elementos de la materia explicaba la tendencia propia de los cuerpos a ocupar su lugar natural. El cambio tenía una causa, y cuatro de ellas explicaban la realidad: material, formal, eficiente y final. El otro gran cambio era la generación.

Una forma de conocimiento distinta a la observación es la especulación, entendida como la pura actividad del cerebro o de la mente. El logos era la capacidad de producir conceptos y establecer relaciones entre ellos, en tanto el pensamiento constituye el producto de la actividad mental que se manifiesta en la creación de conceptos, lenguajes y sistemas.

Aristóteles fue el primero que ofreció un método de acceso al conocimiento de la realidad por medio de las relaciones entre los conceptos, la lógica. Toda frase tiene sentido, pero no todas contienen proposiciones de las que pueda decirse que son verdaderas o falsas. El silogismo fue el instrumento más potente del conocimiento durante un milenio, y Aristóteles describió el método (*Organon*) que permitía construirlo a partir de dos proposiciones (premisas). El silogismo se basaba en la asociación de dos proposiciones ciertas para deducir una tercera también cierta:

Sócrates es un hombre.

Todos los hombres son mortales.

Sócrates es mortal.

La debilidad del silogismo residía en la posibilidad de que la conclusión estuviese

incluida en la primera premisa y no aportase ningún conocimiento. Las reglas de construcción determinaban la existencia de cuatro figuras, cada una de ellas se dividía en modos, aunque de los 256 posibles sólo consideraba útiles 19. La eficacia del método mostró sus debilidades y fue abandonado durante el Renacimiento. En el siglo XVII, Arnaud y Nicole publicaron *La Logique ou l'art de penser* (1662), basada en las cuatro funciones de la mente: comprender, juzgar, decidir y ejecutar, aunque sólo la primera contribuía al conocimiento.

Las matemáticas, la geometría, la filosofía y la cosmología son las formas del conocimiento especulativo. Las dos primeras aportan un conocimiento cierto, en tanto las últimas ofrecen un conocimiento opinable, en el que el consenso confiere validez a sus conclusiones.

Para Aristóteles, la construcción de las cosas requería la existencia de la materia utilizada (causa material) y la idea de lo que se quería hacer (causa formal), mientras que el creador era la causa eficiente y el objeto de su acción la causa final. Los escolásticos añadieron la causa primera, la acción de Dios, pero la teoría de las causas no explicaba la naturaleza de los fenómenos, como el movimiento. El experimento, una idea que en su acepción moderna introdujo Galileo en el siglo XVII, es la reproducción del fenómeno natural cuando se miden las magnitudes para explicar el resultado. El conocimiento científico es el resultado de la observación de la naturaleza. Descubre la composición de la materia, distingue las cosas y seres vivos que hay en el Universo, describe los fenómenos (movimiento, generación) y mide las magnitudes. La validez de los resultados —identificación de los elementos, clasificación de las cosas y los seres, descubrimiento de las relaciones— alcanzó un nivel de eficacia suficiente mediante el experimento, la repetición controlada de los fenómenos naturales.

Con la introducción de la experimentación, aliada con la generalización — en la que la matemática desempeña un lugar destacado— de los datos concretos obtenidos a través de aquélla, comenzó realmente la ciencia tal y como la conocemos hoy.

Capítulo 1

Filósofos, médicos y cirujanos, astrónomos y naturalistas. Observar la naturaleza

Contenido:

§1. *El cielo*

§2. *La Tierra*

§3. *Los seres vivos*

§4. *La especie humana*

Los escritos más antiguos se remontan al III milenio a. C.: tablillas sumerias y jeroglíficos egipcios. China desarrolló la escritura hacia 1600 a. C., mientras que el lineal *B* fue la escritura de los griegos de Creta y Micenas (c. 1375-1200 a. C.). La escritura de los Vedas se sitúa entre los siglos XV y XI a. C. y los jeroglíficos mayas son del siglo VI a. C. Constituyen los restos más antiguos de un pensamiento anónimo. El teorema de Pitágoras, que ya mostraron conocer los caldeos, se encuentra en distintas culturas antes de su atribución al propio Pitágoras. En el siglo VIII a. C. Bauhyana (activo en torno al 800 a. C.), escribió el primer Shulba Sutra, en el que se encuentran varios triples pitagóricos, los números enteros que cumplen con el teorema de Pitágoras, como 3, 4, 5 o 12, 35, 37. El objeto de la ciencia era el conocimiento de la naturaleza, y la observación, el método idóneo para ello. Los objetos específicos de estudio en la naturaleza eran el Cielo y la Tierra, cosas inanimadas que dependían de una acción o fuerza exterior para su movimiento, y los seres vivos —plantas, animales y humanos—, con una fuerza interior. En el siglo V a. C., el Génesis ofreció el relato de la creación, a partir de la nada, del Cielo y la Tierra, la luz, el firmamento, el agua y las plantas, el Sol y la Luna, los animales que habitan los diversos medios, el hombre y, surgida de éste, la mujer.

§1. El cielo

A partir del 3200 a. C., los sumeros iniciaron la observación de los cuerpos celestes, a los que dieron nombre e identificaron por sus caracteres, posición y movimiento. Se calcula en 6.000 el número de estrellas que se pueden observar a simple vista, aunque las conocidas hasta la invención del telescopio (comienzos del siglo XVII) no llegaban a la mitad de esa cifra. Llamaron estrellas fijas a los cuerpos más lejanos, que aparecían siempre en la misma parte del cielo, de las que sólo las más brillantes fueron identificadas al darles nombre y determinar su posición: Polar, Antares, etc. Los cometas eran estrellas que cruzaban el cielo y desaparecían en el horizonte. Todos los que contemplaron la multitud de los cuerpos celestes coincidieron en la conveniencia de identificarlos mediante un catálogo que incluyese nombre, posición, aparición y ocultación. En Alejandría asociaron el brillo a la magnitud, dieron el número 1 a las estrellas más brillantes y el 6 a las más pequeñas de las visibles, cada una con doble brillo que la siguiente. La catalogación de las estrellas fue la primera actividad científica en todas las culturas antiguas conocidas. Los sumerios fueron los primeros en hacerlo. Tras destruir Nínive (612 a. C.), los caldeos, semitas del sur de Mesopotamia, constituyeron un nuevo reino en Babilonia, que duró hasta el 539 a. C.; de ellos se conservan 70 tablillas que recogían observaciones y noticias (*Enuma Anu Enlil*). Un catálogo de 71 estrellas que podría remontarse al II milenio a. C. es el *Mul.Apin*; se trata de la principal fuente de conocimiento astronómico mesopotámico que poseemos (la copia más antigua conocida data del 687 a. C.). Hiparco (190-120 a. C.) reunió noticias de 850 estrellas hacia 120 a. C., mientras que el catálogo de Ptolomeo (siglo I a. C.) incluía 1.022 estrellas fijas, 800 de las cuales eran conocidas por los chinos en el 350 a. C.

La observación del movimiento ascendente y descendente del Sol en el cielo durante el día y el de la Luna durante la noche condujo a concebirlo como una semiesfera, la bóveda celeste. Se descubrió que había un punto, perpendicular en el cielo, al que se llamó «cenit»; también, que al viajar desaparecían unas estrellas y surgían otras distintas.

A partir de estas invenciones se proyectaron los puntos, líneas y figuras terrestres

para observar las estrellas sobre el fondo de la bóveda celeste: al prolongar en las dos direcciones el eje imaginario que atraviesa la Tierra, se determinó el de la esfera celeste con sus dos polos, y al extender el plano del ecuador terrestre se imaginó otro celeste.



Tablilla cuneiforme

Todo lo que había en la Tierra podía representarse por un punto en el cielo, y para facilitar su descripción se introdujeron las constelaciones, grupos de estrellas arbitrariamente asociadas, a las que se asignó una parte de la bóveda celeste, lo que permitía indicar en qué zona del cielo se habían producido los cambios observados. Los sumerios dividieron la bóveda celeste en doce constelaciones, el *Mul.Apin* aumentó el número a 17, Homero menciona las constelaciones de Boyero, Orión y la Osa mayor, Ptolomeo ofreció una lista de 24 y en el siglo III Zang Heng catalogó 2.500 estrellas en 100 constelaciones, mientras que un siglo después Chen Zhui redujo el número de las primeras a 1.484 y aumentó el de las segundas a 283. En 1922, la Unión Astronómica Internacional decidió poner fin a la confusión restringiendo las constelaciones a 88 y describiendo los límites de cada una.

El descubrimiento en 1900 de un pecio en aguas de la isla Antikitera, al norte de Creta, proporcionó un instrumento que recibió el nombre del lugar, aunque su función no se identificó hasta pasadas varias décadas. Los estudios más recientes lo describen como un ordenador analógico que predecía las posiciones de los cuerpos celestes. Las tablas astronómicas, una construcción matemática basada en el registro de los movimientos celestes, permitían calcular la posición de los planetas, las fases de la Luna, los eclipses y otros acontecimientos. Ptolomeo ofreció en el *Almagesto* modelos geométricos que mediante el uso de las correspondientes tablas hicieron posible el cálculo de las posiciones pasadas y futuras de los planetas. Las tablas musulmanas, *Zij*, por su nombre persa, de las que se conservan más de doscientas, se caracterizan por la riqueza de su información. En el siglo X, al-Sufi describió la posición y caracteres de los cuerpos celestes e incorporó una «pequeña nube», la constelación de Andrómeda, además de la «gran nube» magallánica. Ibn Yunis (950-1009) destacó por la precisión de sus cifras y al-Kujandi calculó la inclinación de la eclíptica. Alhacén realizó (1009) observaciones en las que modificó las condiciones de la observación. Los observatorios de Bagdad en el siglo IX, Maraghe en el XIII, Samarcanda en el XV y Estambul en el XVI contribuyeron al conocimiento del cielo. Merecen también mención las célebres *Tablas alfonsíes*, que se utilizaron durante siglos en Occidente y fueron compiladas, por iniciativa y mandato de Alfonso X el Sabio (1221-1284), por Judá ben Mosé e Ishaq ben Sid en el año 1272. Juan de Sajonia explicó el medio de adaptarlas a cualquier lugar. Se copiaron e imprimieron hasta que las *Tablas rudolfinas*, en cuya preparación se sucedieron Tycho Brahe y Kepler, vieron la luz en 1627.

La observación de la marcha del Sol sobre el fondo de la bóveda celeste permitió identificar la línea de la eclíptica y el espacio ecuatorial, entre los 8° norte y los 8° sur del plano del ecuador celeste, en que se producían los fenómenos más significativos, como los eclipses. En algún momento de la primera mitad del primer milenio, los babilonios dividieron el Zodiaco en doce partes iguales, que identificaron por un nombre y un signo que los romanos cambiaron por los

actuales. El Zodíaco (una banda de la esfera celeste de 18° de ancho centrada en la eclíptica) clásico es una adaptación del *Mul.Apin*, y Ptolomeo describió su construcción. La multiplicación de las esferas, una sólida e inmóvil, la Tierra, siete virtuales que transportaban el Sol, la Luna y los planetas, y otra que llevaba a las estrellas fijas complicó la imagen del cosmos. La observación de los movimientos celestes condujo a la definición de las unidades del tiempo astronómico. El día es el tiempo que transcurre entre dos apariciones sucesivas del Sol, y fue dividido en dos partes —día y noche— tomando como referencia la puesta del astro. La duración del día y la noche, medida con un reloj de arena o de agua, mostró que no eran iguales salvo en dos ocasiones (*aequinocetium*). De esta observación dedujeron que el plano de la eclíptica que recorría el Sol era distinto del ecuador celeste y que los equinoccios eran los puntos de intersección de los dos planos. El año era el tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos del Sol por el equinoccio de primavera, que sirvió como punto de partida para medir las distancias ecuatoriales, y llamaron «mes» al tiempo necesario para cruzar una estación del Zodíaco. El siglo no era más que un múltiplo.

La utilidad de registrar la información y predecir los acontecimientos fue el origen del calendario, una necesidad que compartieron todas las culturas, de las que se conservan restos suficientes para reconstruir su utilización y apreciar su precisión. El año solar tiene 365 días «y pico», y el mes lunar 29 «y pico» (el cociente es algo menos de 12, 4 meses). La rotación de la Tierra sobre su eje requiere 24 horas con una velocidad angular de 15° por hora. Los primeros calendarios (datados alrededor de 2.000 años antes de Cristo) eludían las soluciones fraccionarias mediante la acumulación de los restos, de forma que el número de días de un mes era variable. La aparición en el horizonte de Sirio (*Sothis*), después de un largo periodo en el que quedaba oculta bajo la línea del horizonte, marcaba en Egipto el comienzo del año civil, que coincidía aproximadamente con la inundación del Nilo. En torno al 3000 a. C. los calendarios egipcios y sumerios tenían 12 meses de 29 y 30 días, que sumaban 354 días al año, y cada 3 o 4 años los primeros añadían un mes para ajustar los datos a la realidad, operación que los segundos retrasaban hasta pasados

ocho años. En China descubrieron la duración del año y el mes hacia 1400 a. C., y añadían un mes de vez en cuando. El calendario redondo de los zapotecas de Monte Albán (c. 800 a. C.) tenía 365 días y un ciclo de 52 años. Los mayas utilizaron varios calendarios: el *tzolkin* de 260 días para los augurios, el de 365 días, que dividieron en 18 meses de 20 días y cinco más, considerado de mal augurio, y un calendario lunar para la predicción de los eclipses. La falta de un suceso que sirviese como origen del tiempo (era) limitó la utilidad de los calendarios para situar los acontecimientos.

Determinar las dimensiones de los cuerpos celestes y las distancias de éstos a la Tierra y entre dos de ellos fue el siguiente paso en el conocimiento del cielo. La representación del cosmos y el establecimiento de la primera de estas distancias mostraron la posibilidad de medir las magnitudes celestes.

Un resultado muy importante se debió a Eratóstenes (c. 276-194 a. C.). Tras encontrar unos documentos con la noticia de que a mediodía del solsticio de verano la luz del Sol iluminaba el agua del fondo de un pozo en Asuán, pensó que Alejandría estaba en el mismo meridiano y procedió a medir la distancia angular entre ambos puntos, en tanto la lineal era conocida. La primera, mediante el cálculo del ángulo con que incidía la luz en el punto al que llegaba la sombra de un poste, un valor de $7^{\circ} 12'$, que, de acuerdo con el teorema de Euclides de los ángulos internos, era la distancia angular. La segunda, con la ayuda de personas que medían las distancias con los pasos. En Egipto era una práctica conocida, y la distancia entre ambos puntos se estimó en 5.000 estadios (unidad equivalente, para los griegos, a unos 185 m), que se dividían en 125 pasos o 625 pies. Calcular la longitud de un grado y la de la circunferencia eran operaciones elementales, y el resultado contenía un error del 15 %. La medida de la longitud de la circunferencia terrestre (250.000 estadios) fue el resultado feliz de la compensación de las hipótesis asumidas y de los errores previsibles.

Aprovechó también Eratóstenes el eclipse total de Sol del 190 a. C. para medir la distancia al Sol y a la Luna en radios de la Tierra. En la primera se quedó corto y en la otra dio una cifra muy próxima a la actual, con un error inferior al 1 por 200.

Dos discípulos de Pitágoras son recordados como los primeros en proponer la idea del movimiento de rotación de la Tierra sobre su eje, un descubrimiento que se supone sucedió entre 530 y 350 a. C. Aristarco de Samos (310-230 a. C.) describió la rotación de la Tierra en torno al Sol, pero no contempló la realizada por el planeta sobre su eje, algo que sí se hizo con la recuperación del sistema heliocéntrico. No obstante, la experiencia que demostró la realidad de la rotación terrestre se debe a Léon Foucault (1819-1868), que en 1851 colgó de la bóveda del Panteón de París un péndulo que mostraba el giro de la Tierra (la base de este resultado se encuentra en que el plano de oscilación de un péndulo permanece constante con respecto a un observador inercial; lo que se observaba en el Panteón era que el péndulo giraba con el paso de las horas, hasta completar un giro completo, el —en realidad— giro de la Tierra sobre su eje).

Un punto que no conviene olvidar es que la observación con los medios que proporciona el cuerpo humano tiene sus límites; es por esto por lo que hay que resaltar unas contribuciones de Hiparco que marcaron un punto de inflexión en el conocimiento del cielo. Nos referimos a la construcción de instrumentos destinados a medir los ángulos. Hiparco formuló la teoría del astrolabio, cuya invención atribuyó a Eratóstenes, y desarrolló el cuadrante, un instrumento formado por dos piezas perpendiculares, de madera o bronce, unidas por un arco graduado de 90°, con una mira en uno de sus lados. Muy importante fue, asimismo, su formulación del cálculo trigonométrico, cuyos elementos básicos eran seno, coseno, tangente y cotangente.

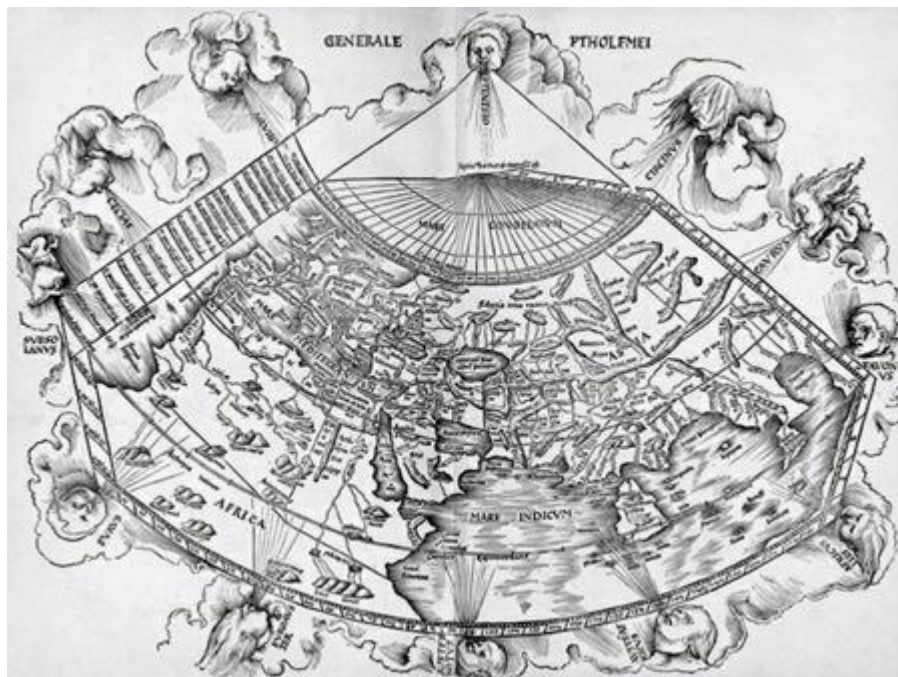
En 140, Claudio Ptolomeo (c. 100-190) realizó la síntesis del conocimiento de los cielos en la *Mathematike Syntaxis* (c. 141), un modelo matemático que explicaba los movimientos del Sol, los planetas y la Luna, y que se conoció como *Ho megiste astronomas* («el mejor astrónomo»), del que procede el nombre árabe (*Almagesto*). El desplazamiento del centro del deferente a un punto distinto al centro de la Tierra (ecuante) le permitió mantener el movimiento uniforme y predecir los movimientos celestes, incluido el comienzo de la eclíptica. Fue la cumbre de la cosmología geocéntrica; esto es, aquella en la que la Tierra ocupaba el centro del Universo.

§2. La Tierra

En el siglo IV a. C. Platón había explicado la naturaleza de las cosas y los seres como la imposición de una idea, la forma, a la materia informe, y Aristóteles (384-322 a. C.) desarrolló la doctrina al considerar que la forma era la causa eficiente y la causa final de las cosas y de los seres. Antes de que hubiese un conocimiento científico de la Tierra, el único cuerpo celeste que los humanos no pueden contemplar con un golpe de vista, se había discutido sobre su forma y posición. Mucho antes de que la expedición de Magallanes- Elcano probase en 1522 la esfericidad del planeta, al regresar al punto de partida navegando siempre hacia el oeste, y de que la tripulación del Apolo 8 contemplase en 1968 por primera vez la esfera terrestre, los observadores habían desechado la idea de la Tierra como un disco plano.

La falta de perspectiva no permitía la contemplación de la totalidad de la Tierra, y los primeros en imaginarse su forma y composición se inclinaron por considerar que era plana, circular o cuadrada, y que se encontraba flotando sobre el Océano. La más antigua representación conocida de la Tierra se encuentra en una tablilla caldea (c. 600 a. C.), el primero de una larga serie de mapas circulares. La superficie de la Tierra aparecía como una masa continental, en la que dos mares — Mediterráneo y Rojo— separaban tres continentes, con Babilonia en el centro y el Océano como límite. En el siglo VI a. C., Anaximandro produjo una imagen que Heródoto describió en términos que recuerdan la anterior, a juzgar por una reconstrucción del siglo XIX. A pesar de su sencillez se reconocen el Mediterráneo, el Nilo, el mar Negro y el río Phasis (Rioni en la actualidad), que separaban los continentes. Hecateo de Mileto (550-476 a. C.) circunnavegó el Mediterráneo (periplo) y describió sus costas y puertos. El mapa que lleva su nombre es más detallado que el anterior, la península ibérica es irreconocible, en tanto la itálica y la helénica no plantean dificultades y hay media docena de islas conocidas. La división en dos continentes, Europa al norte y Asia al sur, es, en cambio, fantástica. Tras un milenio largo, Isidoro de Sevilla volvió en el siglo VII a la representación

circular de la Tierra y sustituyó la representación más o menos fiel de la línea de costa por una construcción geométrica del espacio. Dividió el círculo en dos hemisferios, colocó Asia en la parte superior, y Europa y África, separadas, en la mitad inferior. Dos franjas perpendiculares podrían simbolizar los mares Mediterráneo y Rojo, y el Océano que circundaba la Tierra. Fue el primero de una serie de mapas geométricos conocidos como «mapas TO» por la «T» que se formaba al separar los continentes dentro de la «O» del Océano. Era una construcción simbólica sin valor científico ni utilidad práctica. Fue el modelo de los mapas medievales, que conservaron la imagen circular del Océano y sustituyeron el esquematismo por la fantasía; mapas como los del beato de Liébana en España (1050) o el que se encuentra en el diccionario (1072) preparado por el turco Mahmud al-Khasgari (1005-1102).



Mapa de la Tierra de Ptolomeo, de la edición de la Geographia publicada en 1513 por el cartógrafo alemán Martín Waldseemuller

En el siglo XIII los grandes mapas del monasterio benedictino de Ebstorf (1235), en la Baja Sajonia, y el conservado en la catedral de Hereford (1300), Inglaterra,

enmascararon la construcción circular al incorporar los ríos y multiplicar los nombres. La cosmología budista abundó en la misma idea y en China se concibió la Tierra como un cuadrado plano.

Dicearco de Mesina (siglo IV a. C.) sustituyó la representación circular por una proyección plana e introdujo la primera línea imaginaria (diafragma) desde las columnas de Hércules hasta Rodas para representar las distancias y marcar las posiciones. La idea de la Tierra plana sobrevivió hasta la Edad Media, a pesar de que Aristóteles acumuló argumentos y observaciones en contra: los que viajaban hacia el sur descubrían nuevas constelaciones, la sombra de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse era curva, el casco de un barco era lo primero que desaparecía al alejarse.

Los mapas más antiguos de China se limitan a una parte del territorio. Los siete mapas de Qin (siglo IV a. C.) representan un territorio de 7.000 km², los tres de seda del siglo II son regionales e incluyen las primera coordenadas. El *Da Ming Hun Yi Tu* de 1389 reproduce con notable exactitud el contorno de la costa de China, de forma que compite con los portulanos mediterráneos de Abraham Cresques. La imagen de la Tierra como un disco sobrevivió en India hasta que Aryabhata (476-550) estableció la esfericidad y la rotación del planeta, defendió el heliocentrismo (el Sol en el centro del Universo) y calculó su longitud con menos precisión que Eratóstenes. La versión al árabe de Ptolomeo proporcionó la base sobre la que se construyó la geografía islámica. La fundación abasida de Bagdad en 762 creó un centro científico cuya influencia fue decisiva para la difusión de las ideas ptolemaicas. Hacia el 830, el califa al-Mamun encargó que se midiese la distancia de Palmira a al-Raqqah para calcular la longitud de la circunferencia, y al-Khwarizmi, el más conocido miembro de la Casa de la Sabiduría, completó el *Libro de la apariencia de la Tierra*, que aumentó las coordenadas de las poblaciones a 2.402, tres veces las de Ptolomeo, rebajó la longitud del Mediterráneo calculada por éste de 63° a 50°, más cercana a la realidad, y trasladó el meridiano 0 al este de Alejandría. En el siglo XI, al-Biruni empleó la trigonometría para calcular la longitud del radio terrestre (6.399, 9 km) con un error

del 3, 8 %. Al-Idrisi dibujó un atlas de la Tierra en setenta láminas, la *Tabula rogeriana* de 1154, que mejoraba sensiblemente el conocimiento del este y sur del de Ptolomeo, a cambio de un deficiente dibujo de la línea de costa. Ibn Batutta, el mayor viajero de la Edad Media, reunió toda clase de noticias, pero no ofreció ninguna representación del norte de África y del Próximo Oriente. Los mapas atribuidos a Ptolomeo en la parte cristiana del continente son creaciones del siglo XV y tienen autores conocidos.

Beda fue el primer autor cristiano que asumió la esfericidad de la Tierra en *De temporum ratione* (725), texto en el que se puede leer: «el corazón de la circunferencia representará la figura de un globo perfecto». Los portulanos medievales llevan este nombre por la especial atención y precisión en el trazado de la línea de costa y el dibujo de los puertos. Pietro Vesconte fue el iniciador del género y el autor de un mapa universal (1321), y en Mallorca se produjo en el siglo XIV la pieza más famosa, el *Atlas* de Abraham Cresques. Es dudoso que obras de este valor se utilizasen a bordo de los barcos. Los viajes marítimos a larga distancia crearon una fuerte demanda entre los navegantes y los estudiosos interesados por el conocimiento de la Tierra. La multiplicación de los ejemplares producidos por la imprenta justificó la inversión para mejorar su calidad. Los mapas de Ptolomeo conocieron distintas ediciones y Gerardus Mercator (Flandes, 1512-1594) introdujo la proyección cilíndrica en la que meridianos y paralelos son líneas rectas y las dimensiones se alargan en los extremos.

Conocida la forma de la Tierra y la representación de la esfera mediante la proyección de los puntos de la esfera sobre un plano, hemos de retroceder en el tiempo para resolver un problema aún más complicado, si cabe. La observación de una cantidad inconmensurable de cosas y seres, del cambio y la desaparición de unas y otros, no era el medio de conseguir un conocimiento de la naturaleza. Las culturas primitivas coincidieron en el método para superar la dificultad y llegaron a parecidas conclusiones. La especulación les permitió encontrar la solución. La idea de que las cosas y los seres fuesen compuestos, producidos mediante la asociación en distintas proporciones de un pequeño número de materia simple, llevó a

plantearse el problema de la composición de la materia. La misma idea se encuentra en todas las culturas primitivas, que coincidieron además en su identificación, sustituyendo la enumeración indefinida de las cosas y los seres por la teoría de que estaban formados por un pequeño número de materias elementales sobre las cuales se ejercían influencias. Platón introdujo la palabra «elemento» para designar a cada uno de ellos; Leucipo y Demócrito hablaron de «átomos».

La generación, asociada al agua y la humedad, pudo inducir a Tales de Mileto (625-547 a. C.) a ver en el primero de estos elementos la materia primigenia, mientras que su discípulo Anaximandro (610-547 a. C.) postuló la existencia de una materia sin forma ni límites (*apeiron*) para explicar la aparición de las cosas. Un fragmento de Anaxímenes (586-526 a. C.) explica la naturaleza como la acción de una sustancia móvil y cambiante, extendida por todo el Universo, que al condensarse habría dado origen a la Tierra y el agua, en tanto el Sol y la Luna eran, sin duda, fuego, por la luz que emitían.

Anaxágoras (496-428 a. C.) coincidió en la idea de una materia primitiva (magma) y realizó algunas aportaciones fundamentales: la concepción del magma como una infinidad de partículas homogéneas e inmóviles a las que una fuerza exterior (*nous*) imprimía un movimiento circular. En el siglo V, Empédocles sustituyó la materia primigenia por cuatro «raíces» eternas: tierra, agua, aire y fuego, que se combinaban para crear las cosas y los seres por la acción de dos fuerzas cósmicas (divinas), que identificaba con el amor y el odio, la atracción y la repulsión. En el siglo IV a. C., Demócrito encontró una afortunada denominación para designar, al tiempo que las describía, las partículas indivisibles (átomos), que eran además inalterables e indiscernibles. El movimiento continuo que les atribuía le llevó a postular la existencia del vacío para explicar el movimiento. Al asumir la descripción de Empédocles, Aristóteles identificó las citadas raíces como esencias y describió sus propiedades: el aire es fundamentalmente húmedo y subsidiariamente seco; el fuego, caliente y seco; la tierra, seca y fría; el agua, fría y húmeda. A éstas había que añadir la quinta esencia, el éter, la materia de la parte celestial del cosmos.

La influencia griega explica que los cinco elementos indios fuesen los mismos que los griegos, en tanto que en China coincidían la tierra, el agua y el fuego, no se incluía entre ellos el aire y se añadían otros dos: la madera y el metal. Entre 350 y 270 a. C. construyeron este modelo, más como la descripción de las fases del cambio, que conducen a la destrucción o a la generación, que como una definición material: el agua apaga el fuego, el fuego funde el metal, un hacha metálica corta la madera, un arado de madera abre la tierra, una presa de tierra contiene el agua. En sentido contrario, el agua produce la madera de los árboles, la madera alimenta el fuego, el fuego da lugar a la tierra (cenizas), en la tierra se genera el metal, que, al calentarse, fluye como el agua. La especulación proporcionó los elementos que componían la materia, formando los bloques para la construcción de una imagen de ella. Su diversidad se explicaba por la combinación de los elementos para formar compuestos, cuya composición variaba con la proporción de aquéllos. Era una construcción lógica, lejos de la realidad, como se descubrió al aislar nuevos elementos.

La materia informe no tiene magnitudes y sólo puede medirse a partir del aislamiento previo de una determinada cantidad de ella. Un litro de agua ocupa un volumen y tiene un peso determinado, y las medidas coinciden aunque cambiemos el orden de las magnitudes. La razón entre peso y volumen es una tercera magnitud de la materia, la densidad. Arquímedes (c. 287-282 a. C.) descubrió la propiedad, distinta para cada cuerpo, pero no estaba en condiciones de ofrecer una tabla de densidades. No había manera de identificar la composición porcentual de los cuerpos, y la experiencia descubrió que la división física mediante golpes y cortes no afectaba a las propiedades de la materia, a la naturaleza de las cosas (Aristóteles concebía la identidad de las cosas como la naturaleza, *physis*, de los cuerpos, más que con el sentido general que usamos aquí).

La *physis* era el conocimiento de la naturaleza y «las cosas naturales están sometidas al cambio», que presenta dos formas: el cambio de naturaleza como consecuencia de la modificación de su composición y el de posición que resulta del movimiento. El primero dio origen a la alquimia, que tenía entre sus objetivos la

transmutación de la materia, en concreto del plomo en oro. El documento más antiguo al respecto es la *Tabla de la esmeralda* del mítico Hermes Trismegisto. En el siglo V, Zósimo escribió *El divino arte de producir oro y plata*. Los musulmanes cultivaron la alquimia y publicaron tratados que alcanzaron notable difusión. En el siglo XIII se divulgaron por Europa los trabajos de los más famosos alquimistas, y Arnaldo de Vilanova vio condenadas sus obras por la Inquisición en Tarragona. La fama de Raimundo Lulio (1232-1315) llegó al punto de que muchos firmaron sus trabajos con su nombre, lo que explicaría los 486 títulos que se le atribuyen. Los que habían contribuido a sus experiencias se volvieron contra él cuando no obtuvieron el oro buscado, lo que contribuyó a su decadencia en el siglo XIV. La alquimia era una línea de investigación condenada al fracaso, aunque no a la desaparición, en la medida en que constituyó un paso previo a lo que denominamos «química».

Al postular la unidad del ser —«el ser es, el no ser no es»—, Parménides (siglo VI a. C.) negó la posibilidad del cambio, incluido el movimiento. Zenón de Elea (siglo V a. C.) argumentó en favor de su maestro al proponer ocho paradojas que negaban la posibilidad del movimiento de los cuerpos. Una de ellas es la de la flecha inmóvil. En un instante de tiempo, una cantidad mínima, la flecha puede estar en el punto que ocupa o en otro distinto. En el primer caso no hay movimiento y en el segundo el tiempo no es suficiente para que se produzca el cambio. Si no hay cambio en un instante tampoco puede haberlo en una sucesión de éstos, y el movimiento resultaba imposible. En el fondo, postulaba que la divisibilidad infinita del espacio implicaba la del movimiento. Aristóteles ofreció dos teorías distintas del movimiento. Una, la de la caída de los graves, se basa en la idea de que los cuerpos buscan la posición que corresponde a su naturaleza: la gravedad de la tierra y el agua, la levedad del aire y el fuego. El aumento de velocidad de los primeros al acercarse al suelo venía determinado por el deseo de alcanzar su lugar natural. La observación del lanzamiento de una piedra con la mano o por una catapulta explicaba el carácter rectilíneo, incluso ascendente, del movimiento. El impulso (*ímpetus*) recibido se consumía con el movimiento y al cesar se restauraba el

movimiento natural.

§3. Los seres vivos

El relato bíblico muestra a Adán como el primer naturalista que se ocupó de los seres vivos: «Y dio el hombre nombre a todos los ganados y a todas las aves del cielo y a todas las bestias del campo» (Génesis 2.20). La domesticación de las plantas y los animales fue un momento decisivo en el desarrollo de la humanidad, en tanto que la observación de las manifestaciones de la vida, la generación, los movimientos (voluntarios y automáticos) del cuerpo y la muerte proporcionó los medios del conocimiento científico. No hubo acuerdo sobre la definición de la vida, del mismo modo que no lo hubo con las otras manifestaciones de la energía. La separación de los animales y las plantas respondía a la capacidad o falta de movimiento propio. La clasificación de las especies no se ajusta por completo a las circunstancias del medio: hay mamíferos en la tierra y en el agua, hay pájaros e insectos en el aire. La identificación de las especies fue el primer paso, semejante a la de los cuerpos celestes; la clasificación de las especies en organizaciones superiores permitió a Aristóteles crear la «escalera de la vida», el primero de los «árboles de la vida».

El conocimiento de los seres vivos se limitó a los caracteres observables a simple vista hasta la invención, en el siglo XVII, del microscopio, en tanto que la disección permitió describir las diferentes partes del cuerpo. En las plantas se identificaron tres partes: raíz, tallo y hojas, y en los animales se distinguió a las especies por tener o no esqueleto (vertebrados e invertebrados), sangre y otros caracteres. La anatomía describe la composición de los seres vivos y la fisiología las funciones y funcionamiento de los diferentes órganos. Aristóteles atribuyó la acción de la energía a un elemento inmaterial, la *psique* (*anima* en latín), que definió como el principio de la vida, inseparable del cuerpo a la que la atribuía. La vida se manifestaba en tres tipos de seres: plantas, animales y humanos, que se distinguían por la presencia de una o más «ánimas»: la vegetativa, común a todos y que explicaba la generación, la nutrición y el crecimiento; la sensitiva, que

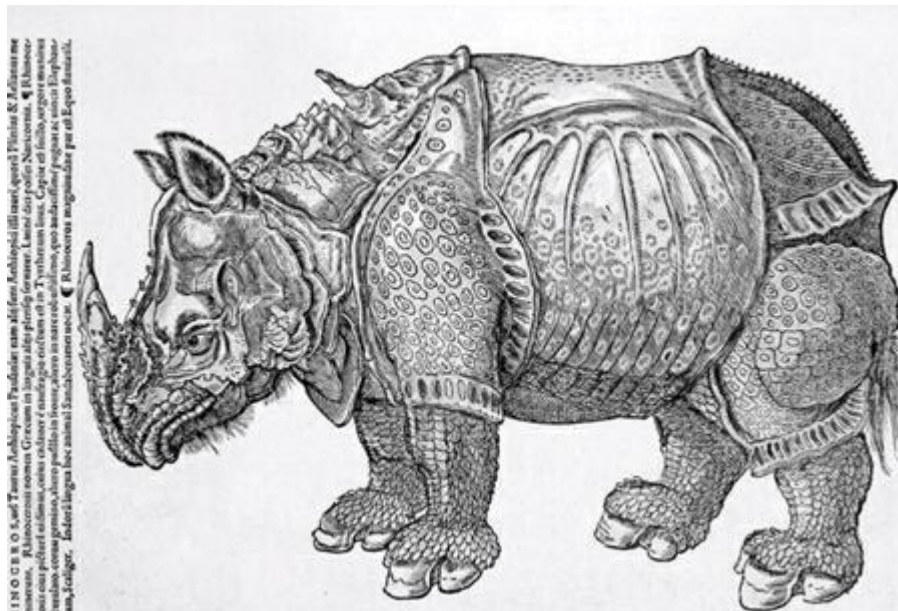
producía las sensaciones y el movimiento propios de los animales; y la intelectual, que generaba el conocimiento y la acción.

Los nombres comunes más antiguos de seres vivos se encuentran en tablillas cuneiformes, que identificaron más de 250 especies de plantas y un número apenas menor de animales. Distinguían a los peces de los otros animales acuáticos y de los moluscos, y esbozaban un principio de clasificación basado en el medio de locomoción, que diferenciaba a las serpientes, sin patas, de los bípedos y los cuadrúpedos. La reproducción de las plantas y los animales provocó especial interés, que se manifestó en la selección de las simientes y de los ejemplares para mejorar el rendimiento de las primeras y las cualidades de los segundos. Un bajorrelieve del Museo Británico fue interpretado como una ilustración de la polinización artificial de la palma datilera, lectura posteriormente discutida.

Aristóteles es el primer naturalista cuyos textos se han conservado aparentemente, y descontando lo que significó el atravesar varias culturas e idiomas, en su literalidad. Del mismo modo que los observadores del cielo hicieron catálogos de las estrellas, Aristóteles describió 540 especies animales, en su mayoría peces, de las que había diseccionado más de 50. La identificación de esas especies le llevó a realizar una clasificación en ocho clases, que conservó su vigencia hasta el siglo XVIII, motivo por el que es considerado uno de los grandes naturalistas de la historia. La división entre animales con y sin sangre correspondía a la que hoy se establece entre vertebrados e invertebrados. Distinguió entre los primeros a los vivíparos (mamíferos) y a los ovíparos (pájaros y peces). Obras suyas como *Historia de los animales*, *De la generación de los animales* y *De las partes de los animales* fueron construidas a partir de la observación y, en bastantes casos, de la disección, lo que le permitió, por ejemplo, describir las cuatro cámaras del estómago de los rumiantes y la anatomía de los peces. La presencia de los mismos órganos en distintas especies se utilizó para la primera clasificación de los animales, y se basaba en la función de las distintas partes del cuerpo. Prestó especial atención a la reproducción: observó la evolución del huevo mediante la disección en distintos momentos de su desarrollo; descubrió que los órganos se

formaban sucesivamente, en contra de la tesis de la preformación de todos ellos, que reducía dicha evolución al crecimiento. La idea de una organización progresiva de los seres vivos le llevó a concebir la citada escalera de la vida, con once niveles. Las plantas ocupaban los niveles inferiores, los animales procedentes de un huevo se encontraba en una posición intermedia y en la superior se situaban los que producían crías vivas.

Teofrasto (370-288 a. C.), discípulo y sucesor de Aristóteles en la dirección del Liceo, se dedicó al estudio de los minerales y las plantas; escribió el primer tratado que identificaba las características de aquéllos y describió más de 500 especies de plantas mediterráneas. La clasificación de este material en *De historia plantarum* respondía a criterios externos y heterogéneos: árboles, arbustos, hierbas, cereales y, en último término, aquellas que producían secreciones como la resina y la goma.



Rinoceronte, según Durero

Estudió la reproducción de las plantas e introdujo términos que subsisten hoy, como «carpio» para designar el fruto y «pericarpio» para la cubierta de la semilla, distinguiendo entre éstas y las que no la tenían (gimnospermas) y entre las poseedoras de uno o dos cotiledones. Analizó, asimismo, la forma en que se

disponían las flores (inflorescencias) y en el último volumen del libro citado estudió la acción de las plantas en la medicina. En *De causis plantarum* describió los cambios debidos a las modificaciones en el medio y en las prácticas del cultivo. La bibliografía griega y romana —2.000 títulos de 326 autores entre los primeros y 146 entre los segundos— proporcionó a Plinio el Viejo (23-79) el material para su gran *Historia natural*, una enciclopedia en 37 libros de gran utilidad por la riqueza de la información que contenía. Cuatro de ellos estaban dedicados a la geografía, dos al Mediterráneo y uno a cada continente, excluido el interior de Europa; otros cuatro a los animales, terrestres y marinos, los pájaros y los insectos; seis a las plantas y dos más a los jardines y sus flores. Las plantas medicinales ocupaban ocho libros e idéntico número dedicó el autor a los medicamentos de origen animal y mineral. Dioscórides (c. 40-90), uno de sus contemporáneos griegos, fue el iniciador de la farmacopea al describir en *De materia medica* un total de 600 plantas, sus aplicaciones terapéuticas y la preparación para su uso. En lugar de recurrir al orden alfabético habitual, organizó el material en función de sus efectos fisiológicos, que examinó en todos los casos, una práctica que llegó hasta China.

§4. La especie humana

El conocimiento del cuerpo humano y de sus funciones fue objeto de un especial interés, por razones obvias: el deseo de los humanos de superar los efectos de los accidentes y curar las enfermedades que padecían. El traumatismo era una afección del organismo, consecuencia de una acción mecánica violenta: el parto, la fractura de los huesos, la amputación de un miembro. Las intervenciones más antiguas fueron la circuncisión, por prescripción religiosa para los judíos, y otras más delicadas, como la trepanación y la extirpación de cataratas. Al ser contraria a la manipulación corporal, la cultura china sufrió un retraso en su desarrollo. Se utilizaron cuchillos de obsidiana en Egipto y América, de cobre en Sumeria y Egipto en el III milenio a. C. El Código de Hammurabi (c. 1700 a. C.) contiene prescripciones para indemnizar a víctimas de la mala práctica.

Por su parte, la enfermedad es la consecuencia de una anomalía orgánica que

produce trastornos en las funciones del cuerpo, patentes en forma de síntomas: fiebre, dolor, vómitos, debilidad, pérdida de apetito, etc. La causa y el tratamiento de la enfermedad requerían el conocimiento material del organismo y sus fluidos (anatomía) y el de sus funciones naturales (fisiología). El cuerpo humano no permite el acceso a su interior sin causar graves daños al sujeto, circunstancia que explica el radical rechazo de la vivisección e incluso el de la disección de cadáveres. Hasta el siglo XIX no se adquirió un conocimiento completo del cuerpo humano. Las primeras noticias anatómicas se encuentran en tabillas cuneiformes (c. 3400 a. C.). El embalsamamiento de los faraones contribuyó al conocimiento de la anatomía y a la práctica de la cirugía. El tratado de anatomía más antiguo se encuentra en un papiro datado alrededor de 1600 a. C. que describe el corazón, el hígado, el útero y los vasos sanguíneos procedentes del primero de los órganos citados. El papiro Ebert muestra el corazón como el punto en que convergen todos los vasos por los que circulaban los fluidos: sangre, lágrimas, orina y esperma. En China, la importancia dada a las fuerzas naturales del yin y el yang no contribuyó al desarrollo de la anatomía, mientras que la acupuntura era un tratamiento polivalente basado en la idea de la existencia de un fluido energético que circulaba a través de sus propias vías (meridianos). La estimulación de los puntos de mayor concentración (acupuntos) mediante la aplicación de unas agujas metálicas pareció un remedio universal. Los textos más antiguos sobre la materia son de 600 a. C., siendo la primera intervención documentada la que se realizó en el año 16 por un carnicero en presencia del médico de la corte. A lo largo de un milenio los bandidos proporcionaron la materia prima para la ciencia y a comienzos del siglo XII se publicaron dibujos tomados durante una ejecución (*Atlas de la verdad*). Sin una base anatómica la fisiología no podía evitar la especulación.

Un papiro egipcio de alrededor del 1600 a. C. es el primer tratado que ofrece explicaciones naturales de las enfermedades y muestra especial atención al tratamiento de las heridas. De la misma época, el *ayurveda*, antiguo sistema de medicina tradicional originado en la India, describió las enfermedades y su terapéutica.

Muestra de la importancia de la medicina para las grandes culturas antiguas es que uno de sus dioses se ocupaba de la materia: Asclepio entre los griegos, Esculapio entre los romanos. A los dos se dedicaron templos, a los que acudían pacientes en busca de curación. En Grecia existían varias escuelas de medicina, que coincidían en el bajo nivel de sus conocimientos de anatomía y fisiología y en la ausencia de cualquier práctica quirúrgica. La gran figura fue Hipócrates (c. 460-370 a. C.), que pasa por ser el autor de un corpus de sesenta textos, de los que sólo cinco se consideran propiamente suyos (ninguno se ocupa de la anatomía). Al tratar de las fracturas, muestra un buen conocimiento de la inserción de los huesos; acerca de las partes blandas tenía ideas confusas, cuando no erróneas; no distinguía las venas de las arterias; creó la voz «nervio» para referirse al tendón, y concebía el cerebro como una glándula que producía un fluido viscoso. Uno de los autores del *corpus Hippocraticum* descubrió las válvulas del corazón, pero no pudo explicar su función. Su yerno, Polibio (siglo V a. C.), escribió uno de los tratados hipocráticos, *Sobre la naturaleza del hombre*, en el que ofreció una caracterización del individuo sobre la base de la existencia de cuatro flujos orgánicos (humores): sangre, flema, bilis negra (melancolía) y bilis amarilla (cole). Sostuvo que la influencia dominante de uno de ellos caracterizaba a las personas: sanguíneas, coléricas, flemáticas y melancólicas. El desequilibrio de los humores (discrasia) era la causa de las enfermedades, y la curación se conseguía mediante la reducción del principio dominante a través de sangrías y purgas —cuyos efectos, negativos si no mortales, sufrieron los pacientes durante dos milenios— y por el refuerzo del principio contrario: contra la fiebre debida a la bilis amarilla, cálida y seca, se prescribían baños de mar que aumentaban la flema, húmeda y fría. En el caso de un exceso de flema, el tratamiento consistía en permanecer en la cama y beber vino. Aristóteles no tuvo ocasión de practicar la disección de los cuerpos humanos, lo que explica que hiciese del corazón el órgano de la conciencia, en tanto creía que la función del cerebro era enfriar la sangre.

Médicos y cirujanos observaron la *physis* (naturaleza) de sus pacientes; algunos disecaban los cadáveres y unos pocos no se detuvieron ante la vivisección de los

animales más fáciles de conseguir, como el cerdo, y de aquellos que les parecían más próximos, por ejemplo distintas especies de monos. La anatomía describía los órganos del cuerpo, y la fisiología, las funciones de cada uno de ellos. La cirugía, en concreto la trepanación, es la única técnica que ha dejado restos inequívocos de su práctica.

Cuando contemplamos la medicina antigua desde la ventajosa perspectiva de nuestros conocimientos actuales, debemos reconocer que los conocimientos biológicos, químicos y físicos disponibles hacían muy difícil ir más allá de la forma, esto es, de la anatomía. Y cuando se habla de esta rama de la medicina, aunque entretrejida con otras consideraciones, hay que dirigirse hacia Alejandría, la nueva ciudad fundada en el delta del Nilo por Alejandro Magno, y luego al mundo romano. Fue en ese entorno, todavía penetrado por la cultura griega, donde vivió un hombre cuyo nombre terminó asociándose al vocablo «médico»: Galeno de Pérgamo (129-216), una ciudad está situada en el noroeste de Asia Menor, que rivalizaba con Alejandría en desarrollo cultural.

Autor prolífico (parece que utilizó veinte escribientes para transcribir sus palabras), aunque muchas de sus obras se han perdido, la síntesis de la medicina que elaboró, y que dominó la historia de esta disciplina durante más de 1.500 años, estaba basada en la tradición hipocrática, en Platón y en Aristóteles. De Platón tomó la idea de la existencia de tres sistemas corporales —corazón, hígado y cerebro— conectados también a los estados mentales, y de Aristóteles el interés por la investigación práctica, iluminada por el razonamiento lógico, aunque al incardinarse éste en la teoría médica le condujese con frecuencia a confiar excesivamente en la capacidad discursiva de la razón.

En el ámbito experimental, Galeno se ocupó de muy diversas cuestiones, entre ellas las variaciones del pulso, la relación de la pérdida de sensibilidad y la parálisis con determinados nervios y con la médula espinal, o la demostración de que la orina llega a la vejiga a través de los uréteres. Ofreció, asimismo, la primera descripción de las cuatro cámaras del corazón, aunque cometió el error de suponer que la sangre retornaba por los mismos canales. Según él, la sangre procedente del hígado

y el corazón circulaba por todo el cuerpo hasta consumirse en la formación de tejidos. La circulación recorría un camino único, pero la diferencia entre venas y arterias exigía que sus funciones fuesen distintas, de acuerdo con el principio de que la naturaleza no hace nada en vano. La solución que propuso al respecto suponía que las arterias llevaban sangre y la fuerza vital (*pneuma*), en tanto por las venas circulaba la sangre, y supuso la idea de la comunicación entre ambos circuitos por unos vasos invisibles (capilares).

En cuanto a sus aportaciones a la anatomía, se esforzó por unirla con la fisiología, una senda todavía poco frecuentada. A pesar de la firmeza con la que se refería a los requisitos para una buena práctica anatómica, no fue él mismo demasiado exigente en este dominio, seguramente por la dificultad (a la que también aludía) de encontrar cadáveres con los que practicar. Sabemos que aunque trabajó ocasionalmente con algunos cadáveres humanos, las fuentes de sus enseñanzas anatómicas procedieron casi exclusivamente de otros animales, sobre todo de monos. Pero su prestigio fue tan grande, el poder de sus escritos tan abrumador, que defectos como éstos tardarían casi 1.500 años en ser señalados.

Capítulo 2

Haciendo números, elaborando teorías. La especulación

Contenido:

- §1. *Contar: números naturales*
- §2. *Medir, calcular: números reales*
- §3. *Axiomas y teoremas: geometría y trigonometría*
- §4. *Ecuaciones, álgebra*
- §5. *Cosmología: el sistema geocéntrico*
- §6. *La aplicación del cálculo a la observación*
- §7. *La especulación médica*

Aristóteles estableció tres tipos de conocimiento: productivo (técnica), práctico, que determinaba la acción, y teórico, dirigido al descubrimiento de la verdad. Distinguió por su objeto entre la filosofía prima (lógica, metafísica), secunda (ciencias naturales) y las matemáticas. La segunda (*physike*) se basaba en la observación, mientras que las otras dos lo estaban en la especulación, un término que en latín se asociaba a la observación. Sólo en el siglo XIV se admitió que en el pensamiento teórico la razón puede construir sin acudir a la observación. La Revolución Científica demostró el valor del conocimiento de las magnitudes, propio de la observación, y Hume limitó el conocimiento al empirismo. Fue entonces cuando Kant publicó la *Crítica de la razón pura* (1781), en la que postulaba que el origen del conocimiento no estaba en las cosas ni en las sensaciones, sino en el sujeto que lo concibe, en la razón pura, que, condicionada por los *a priori*, determina las posibilidades del conocimiento. Para entonces la especulación había creado un cuerpo de conocimiento sistemático y válido, en cuanto que había sido demostrado racionalmente, como las matemáticas y la geometría, junto a otros como la alquimia y la cosmología, que se revelaron falsos. La especulación se construye a partir de conceptos y proposiciones que se formulan con palabras y números; el lenguaje común es necesario para definirlos y

relacionarlos, en la medida en que se crea otro especializado para cada una de las materias objeto de conocimiento. Contar: números naturales Contares la forma de conocer el número de las cosas iguales o distintas que hay en un montón. Para contar, las culturas históricas crearon la sucesión de los números enteros y positivos (llamados «naturales») de razón uno: 1, 2, 3... n . La aplicación uno a uno de las cosas y los números ofreció la respuesta: el número asignado a la última cosa del montón indica la cantidad de éstas. Para decir y escribir una cantidad más grande que ninguna otra las sociedades primitivas encontraron un artificio común, aunque se distinguieron por el valor que tomaron como base para la numeración. La unidad base tiene un valor determinado y, al llegar a éste, el conteo sigue mediante la asociación a la base de las unidades anteriores. Cabe imaginar la razón de tomar como base una cantidad determinada: por ejemplo, 5 son los dedos de la mano y con los de la otra se puede contar hasta 30, son 10 los de las dos manos, 12 es múltiplo de 2, 3, 4 y 6, y 60 lo es, además, de 5, 10, 12, 15, 20 y 30, circunstancias que facilitan el cálculo. Por otra parte, ahora usamos la base 2 para comunicarnos con los ordenadores. La base decimal fue la más extendida en la Antigüedad, y la sexagesimal se conservó para medir los grados de la circunferencia y la duración del tiempo. En el sistema decimal los números que siguen a diez se dicen once, doce., dieciséis, etc. Cada rango tiene un nombre propio, decenas, centenas, millares, millones, etc., y sin necesidad de mención al anterior se puede decir y escribir cualquier número. Del mismo modo que se formaban palabras con letras, se representaron las cantidades con numerales y, para limitar su número, se repitieron los mismos signos.

Los sumerios, condicionados por la espátula que usaban para escribir, repetían los signos hasta 60, que se distinguía del 1 por su mayor tamaño. Los jeroglíficos egipcios se limitaban a las potencias de 10: $10^0 = 1$, $10^1 = 10$, $10^2 = 100$. Los griegos utilizaron las 24 letras de su alfabeto, incluidas tres que, habiendo caído en desuso, emplearon como numerales del 1 al 9, del 10 al 90 y del 100 al 900. Antes del siglo III a. C., y para evitar errores de lectura, el sistema ático introdujo un numeral para 5, 50, 500., que limitaba a cuatro las repeticiones.

Y los romanos siguieron su ejemplo:

I	V	X	L	C	D	M
1	5	10	50	100	500	1.000

La serie infinita de los números enteros y positivos permitía contar cualquiera que fuese su cantidad: cualquier número de una serie tiene valor igual al anterior más una unidad. Contar es lo mismo que sumar.

Para expresar una cantidad, se repiten los dígitos, nueve rayas para 9, y se acumulan los valores de los dígitos. En Grecia, 4.326 se escribía XXXXHHHΔΔΠΙ —donde I representa el 1; Π, el 5; Δ, 10; H, 100; y X, 1.000 (M representaba 10.000), y en Roma, MMMCCCXXVI. En el Renacimiento se encontró el medio de simplificar estas representaciones de cifras, mediante la limitación a tres del mismo dígito y la incorporación de otros menores situados a la izquierda de uno mayor del que se restaba su valor. MDCCCCLXXXVHH, nuestro 1.999, se escribió desde entonces MCMIC. Todos estos sistemas eran acumulativos y los valores representados se obtenían por la suma del valor de cada uno de los numerales. En China tenían un sistema multiplicativo, en el que escribían las cantidades en columna, y debajo de cada una indicaban el rango: decenas, centenas, etc.

Los griegos representaron los números como puntos de una línea graduada. La secuencia de los números se expresaba mediante pequeñas líneas perpendiculares a las que se añadía el numeral correspondiente. Como queda dicho, contar es lo mismo que sumar. La adición de 5 y 3 se obtiene cuando se busca el tercer elemento de la sucesión a partir de 5. La cuenta atrás permite calcular el resto, en tanto el producto y el cociente se obtienen mediante saltos de tantas cifras como las indicadas por el multiplicador y el divisor. Número y cantidad son una misma cosa, ambos son infinitos y lo mismo sucede con las voces y signos que los representan.

Al definir la razón como la relación entre dos magnitudes, se comprobó que la

razón entre la longitud de la circunferencia y la de su radio y la de la hipotenusa, cuando cada uno de los catetos es igual a la unidad, no se podían expresar como una fracción entre dos números enteros. Tales fracciones, representadas, respectivamente, por los símbolos π y $\sqrt{2}$, recibieron la denominación de números «irracionales».

Eudoxo (408-355 a. C.) definió la proporción como la igualdad de dos razones $a/b = c/d$ y descubrió que los productos de los productos externos e internos eran iguales: $a \times d = b \times c$. La sucesión de los números enteros (positivos, cero y negativos) fue la primera de una serie de ellas. La distinción de los números pares e impares dio origen a dos nuevas sucesiones, la definición de los números primos, divisibles únicamente por 1 y por sí mismos, añadió otra más, que Eratóstenes construyó mediante la aplicación de un algoritmo, la criba que lleva su nombre, y Euclides demostró que constituían una serie infinita.

De una cantidad mayor de otra menor surgieron los números *negativos*. Y al dividir dos enteros que no fuesen múltiplos aparecieron los fraccionarios y decimales. Con estos se formó la clase de los números racionales.

§2. Medir, calcular: números reales

Uno de los primeros instrumentos de cálculo aún en uso fue el ábaco, máquina basada en la suma, compuesta por hilos o varillas de metal dispuestos en paralelo en los que estaban insertadas, pero permitiendo su desplazamiento, una serie de bolas. Tuvo una larga vida; de hecho, aún se utiliza en Extremo Oriente (en China se denomina *suan pan*). En matemáticas, la divisibilidad es la propiedad de los números que dan resultados enteros al dividirlos por un entero. La mayor parte de las tablillas babilónicas eran tablas de multiplicar, de recíprocos, de cuadrados y cubos, que dispensaban de hacer los cálculos. El desarrollo de los algoritmos para las cuatro operaciones aritméticas comenzó en la India en el transito del siglo X al XI (la palabra se creó en el siglo XII en Europa, al tomar el nombre de al-Khwarizmi para designar la operación).

Para representar las fracciones, los egipcios crearon los inversos, aunque sólo

utilizaron las de numerador 1 y el $\frac{2}{3}$. Cuando el resultado no cumplía esta condición lo convertían en una suma de fracciones con numerador uno; así, $\frac{2}{29}$ se convertía en $\frac{1}{24} + \frac{1}{58} + \frac{1}{174} + \frac{1}{232}$, procedimiento que practicaron los bizantinos hasta el siglo XIV. Durante siglos las soluciones negativas se consideraron falsas. Hacia el año 600 a. C. los indios utilizaban números negativos para representar las deudas, un uso condicional. En la China del siglo I a. C. se mencionan los números negativos y en Grecia no se emplearon hasta el siglo III. Diofanto calificó de «absurdo» el resultado de la ecuación $4x + 20 = 0$. En el siglo VII, Brahmagupta definió la fórmula cuadrática que aún se utiliza. Bhaskara, en el XII, extraía raíces negativas de las ecuaciones cuadradas, pero indicaba que no se debían tomar en consideración en honor a la opinión pública: «el pueblo no acepta las raíces negativas». Fibonacci (c. 1170-1240) las admitía en los cálculos financieros y se concebían como deudas o pérdidas. Hasta el siglo XVII los números negativos no fueron aceptados, y en el siguiente, incorporados, aunque sus resultados seguían ignorándose por considerarse sin sentido.

El cálculo aritmético era suficiente para resolver problemas elementales, que utilizaban números racionales y no precisaban más operaciones que las citadas. La exactitud del cálculo requería nuevas operaciones, la única garantía contra el error del calculista era muy laboriosa, un mínimo de seguridad podía exigir tres operaciones para obtener dos resultados iguales. Para comprobar la exactitud de una multiplicación o división se acudió a un algoritmo, «la prueba del nueve». La multiplicación con números negativos aconsejó crear la regla de los signos: la multiplicación de «+» por «-» tiene un valor negativo (las deudas pueden multiplicarse), en tanto el valor positivo de «-» por «-» es una convención tardía.

Los papiros de Rhind y de Moscú, así como las tablillas babilonias, contienen problemas que se resolvían por métodos aritméticos. Los egipcios utilizaban el método de la falsa posición para solucionar problemas sin necesidad de acudir a fórmulas algebraicas, y lo mismo hacían los chinos un milenio después. Uno de los enunciados decía: «un montón y un tercio de él suman 36». Las tablillas babilónicas del II milenio a. C. contienen problemas con potencias de segundo

grado (cuadrado) y excepcionalmente de tercer grado (cubo), aunque no utilizaban ningún símbolo.

Una sucesión de números que se ajustan a una razón determinada es una serie; la de los números enteros se caracteriza porque el siguiente es igual al anterior más uno, lo que la hace infinita. El descubrimiento de los números primos, divisibles por 1 y por ellos mismos, permitió a Eratóstenes construir una sucesión también infinita. En 1228, Fibonacci incluyó en el *Liber abaci* una famosa sucesión en la que cada elemento es igual a la suma de los dos anteriores, que comenzaba 1, 1, 2, 3, 5, 8...

Tras una estancia en Egipto y en Babilonia, Pitágoras se instaló en Crotona y fundó una fraternidad dedicada a la práctica y la enseñanza de las matemáticas. El aislamiento y los ritos secretos que sus integrantes practicaban provocaron un conflicto con la población que condujo a la dispersión de la comunidad, aunque sus miembros fueron activos durante dos siglos. La escuela contribuyó al debate sobre la composición de la materia, al considerar los números como el elemento fundamental: «todas las cosas son números». Además, creó nuevos tipos de números; los llamados «amistosos», cuando la suma de los divisores de uno coincidía con el otro, si bien sólo encontraron un caso (284 y 220). Fermat hallaría el segundo en el siglo XVII (17.296 y 18.416) y en 1747 Euler ofreció una lista de 30 pares. Un número era «perfecto» si su valor coincidía con el producto de sus divisores, como ocurre en el caso del 6. La construcción de polígonos homólogos de dimensiones crecientes distinguió los números triangulares, cuadrados y pentagonales. La serie más conocida y la que produjo mayor cantidad de proposiciones es la de los números primos. La citada «criba de Eratóstenes» permitió identificarlos sin necesidad de acudir al cálculo y Euclides demostró que su número era infinito. La descomposición de dos cantidades en los números primos permitió a Euclides descubrir el mínimo común múltiplo y el máximo común divisor, que facilitaron el cálculo.

Las magnitudes inconmensurables son aquellas que no se pueden expresar mediante una fracción ni por un cociente exacto, como sucede al calcular la relación entre la circunferencia y el diámetro, que se expresó con el símbolo π y

que se consideraba como constante, aunque su determinación tiene su propia historia: los babilonios utilizaron habitualmente el valor 3 y, en algunas tablillas, el de 3, 125; los egipcios, 3, 1604. El cálculo de la hipotenusa del triángulo formado por la diagonal de un cuadrado de lado igual es $\sqrt{2}$, y la relación entre la diagonal y el lado del pentágono $\sqrt{5}$. Todos ellos son números irracionales, que comprometieron la exactitud de los teoremas numéricos pitagóricos y la pretensión de que los números fuesen el elemento fundamental de la materia. Eudoxo encontró una solución al conflicto en la sustitución de la teoría pitagórica de la proporción por la igualdad de las razones.

§2. Axiomas y teoremas: geometría y trigonometría

Una forma de conocimiento pareja a la de los números es la de las líneas, las figuras planas y los volúmenes, que ofrecen tantas aplicaciones como los números. Aristóteles introdujo la abstracción en la geometría para simplificar los cálculos. Llegó a esa idea trazando una línea recta con un estilete sobre una tablilla; era gruesa, pero hizo abstracción de ello, lo mismo que de las imperfecciones que presentaba, imaginándola perfectamente recta en su pensamiento, idéntica a sí misma en todos los puntos. Y aunque no fuese sino una línea finita, también abstrayendo la imaginó infinita. A su vez, figuras geométricas, como por ejemplo el triángulo, no eran más que una forma compuesta de tres rectas abstractas.

La definición, construcción y cálculo de figuras se llevó a cabo con un instrumental mínimo: la regla y el compás. La línea recta se consideraba, según lo apuntado, indefinida; la intersección de dos líneas rectas daba lugar a un punto y a cuatro ángulos que sumaban 360° . Las paralelas no se encuentran (o, al menos, eso se suponía entonces; hubo que esperar al siglo XIX para que se aceptase la posibilidad de otras geometrías) y la línea que las cruza duplica el número de ángulos y descubre la congruencia y la complementariedad de algunos de ellos. La construcción de los polígonos regulares requería el uso del compás, en tanto que las secciones cónicas, elipse, hipérbola y parábola, no tenían más representación que el dibujo a mano alzada.

En antiguas tablillas babilónicas, entre las que destaca la Plimpton 322, que se sitúa entre 1900 y 1600 a. C., y en papiros egipcios como el de Moscú (1850 a. C.) y el Rhind (1650 a. C.) se hallan importantes resultados matemáticos. La de Plimpton es una colección de triples pitagóricos, mientras que los papiros egipcios presentan problemas y soluciones. Otros documentos, menos conocidos, contienen tablas de operaciones aritméticas y cálculos de áreas para evitar la repetición de los cálculos. Los egipcios conocían el área del triángulo ($\text{base} \times \text{altura}/2$) y tenían un conocimiento elemental de las proporciones. Los babilonios dividieron la circunferencia en 360 partes iguales (grados) y calcularon su longitud, aproximadamente tres veces el diámetro (utilizaban un valor entero de π). Los griegos conocían dos de los cinco sólidos perfectos, el tetraedro y el cubo, construidos con polígonos iguales. La construcción del pentágono condujo a la del dodecaedro. En el *Timeo* de Platón se encuentra una descripción de los cinco poliedros regulares.

En el siglo VI a. C., Tales mostró las primeras proposiciones geométricas, que expuso con la brevedad y precisión que caracterizan sus escritos:

- a. Todos los diámetros dividen al círculo en dos partes iguales.
- b. Un ángulo inscrito en un semicírculo es un ángulo recto.
- c. Dos triángulos que tienen dos ángulos y un lado iguales son congruentes.

Un teorema es una proposición general que, sin ser evidente, es demostrable. El teorema de Pitágoras (siglo V a. C.) era conocido desde un milenio antes en Babilonia y en China, como queda dicho; se atribuye la primera demostración a la utilización de una construcción geométrica basada en la disección de dos cuadrados iguales, en la que intervienen por un lado cuatro triángulos iguales entre sí y, por otro, dos cuadrados más pequeños. El área que queda libre en uno de los dos cuadrados coincide con el cuadrado de la hipotenusa, en tanto los dos cuadrados que se forman en el otro coinciden con los cuadrados de los catetos. La demostración, como las 370 que hoy se conocen, son construcciones geométricas que no pueden proporcionar la exactitud de una demostración matemática.

El cálculo del valor de n era necesario para conocer la longitud de la circunferencia, el área del círculo y también para obtener la cuadratura de éste, uno de los tres problemas insolubles formulados por los griegos. El cálculo numérico llegó en 1992 a identificar un trillón de decimales, sin que aparezca en ellos ninguna fracción periódica. Una solución geométrica fue desarrollada por Eudoxo, que utilizó magnitudes en vez de números, al inscribir un cuadrado en un círculo y duplicar cada lado. La duplicación de los lados da lugar a polígonos más complejos cuya superficie se aproxima a la del círculo sin llegar a alcanzarla nunca. Es el método de exhaustión (preludio del análisis infinitesimal).

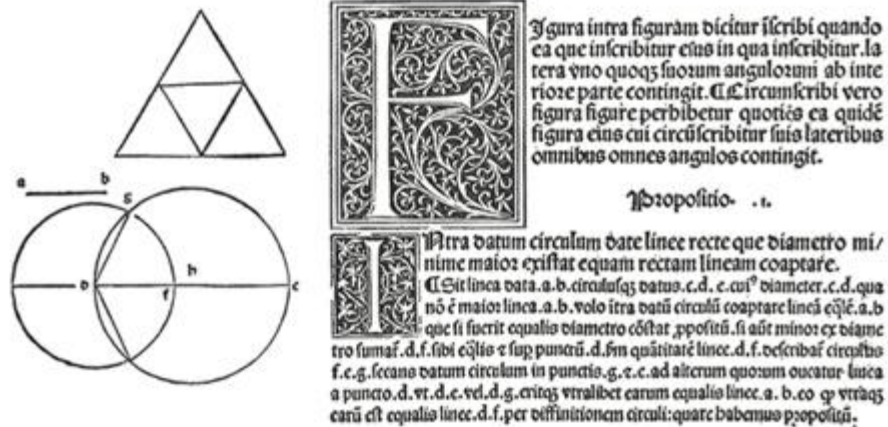
Euclides (c. 350-265 a. C.) reunió los conocimientos fundamentales de geometría y álgebra en los *Elementos*, la obra más influyente en su género, con miles de ediciones (se dice que es el libro reeditado en más ocasiones después de la Biblia). Comienza con las definiciones de punto, línea, ángulo, plano, figura, sólido, y así hasta 23 conceptos. Asimismo, se formulan una serie de principios, de los que cinco son generales (axiomas):

1. Si se añade lo mismo a los iguales, los totales son iguales.
2. El todo es mayor que la parte.
3. La unión de dos puntos es la línea recta.
4. Es posible trazar una circunferencia con un punto como centro y un radio igual a un segmento dado.
5. Todos los ángulos rectos son iguales entre sí.

A partir de ellos demostró las 465 proposiciones o teoremas que componen la obra. Al enunciado de cada una de las proposiciones sigue su demostración y corolarios. Con los *Elementos* de Euclides se inició el método de la postulación, que parte de la formulación de axiomas, proposiciones generales que todos aceptan, y postulados geométricos.

En el libro I se demuestran las propiedades de los triángulos y se incluyen los teoremas que prueban la congruencia de dos de ellos. Se definen las paralelas y sus posibilidades, y se prueba que la suma de los ángulos de un rectángulo es dos

rectos. Para llegar a este resultado los únicos instrumentos que se utilizaron fueron la regla y el compás. En el libro IV se construyen los polígonos regulares de 3, 4, 5, 6 y 15 lados, y su inscripción en un círculo.



Figuras geométricas. Página de Elementos, de Euclides

Euclides dedicó tres libros a exponer el pensamiento de Eudoxo, formuló el teorema fundamental de la aritmética, según el cual «todo entero mayor que uno se puede expresar como el producto de números primos». Merece mención especial Arquímedes (c. 287-212 a. C.), que proporcionó el primer procedimiento conocido para calcular el valor de π , para lo cual utilizó el método de exhaustión: construyó un polígono inscrito y otro circunscrito a un círculo, calculó el perímetro de ambos y situó el valor de π entre dos cocientes: $223/71$ y $22/7$. Ptolomeo utilizó una tabla de cuerdas que daba las longitudes de éstas para ángulos de uno y medio grado. La longitud de la cuerda correspondiente a un grado se multiplicaba por 360 y el producto se dividía por la longitud del polígono, para obtener el valor de π , $3^{\circ} 8' 30''$, que equivale a $377/120 = 3, 1416$. Zu Chong-Zhi (c. 480) obtuvo los seis primeros decimales exactos, 3, 141592, resultado que no se mejoró hasta el siglo XVI. La medida de los triángulos se basa en la de los ángulos interiores de las figuras planas de tres lados. Se mide en grados de circunferencia; mientras que el ángulo «recto» es el que se forma por la intersección de dos rectas perpendiculares

(90°), los que son mayores se denominan «obtusos» y los menores «agudos». Los matemáticos de Alejandría y los romanos dedicados al estudio de los triángulos rectángulos definieron las razones trigonométricas: seno, coseno, tangente (el cociente, respectivamente, entre el lado opuesto al ángulo y la hipotenusa, el lado adyacente y la hipotenusa, y entre el seno y el coseno).

El estudio de las relaciones entre ángulos o, en otras palabras, la identificación de las razones que se observan entre los lados y los ángulos de los triángulos rectángulos, cuyo valor se expresa en grados, constituye la trigonometría. Hiparco de Nicea (c. 149-120 a. C.) creó un método específico para medir los valores de las razones, que, expresado en forma algebraica, es como sigue:

$$\text{seno } \alpha = a/c$$

$$\text{coseno } \alpha = b/c$$

$$\text{tangente } \alpha = a/b$$

Las razones inversas son:

$$\text{cosecante del seno } \alpha = c/a$$

$$\text{secante del coseno } \alpha = c/b$$

$$\text{cotangente de la tangente } \alpha = a/b$$

Entre los muchos resultados trigonométricos, mencionaremos la ley de los senos, que describe las proporciones entre los ángulos y los lados, A , B y C , de un triángulo:

$$a/\text{seno de } A = b/\text{seno de } B = c/\text{seno de } C$$

La invención de la trigonometría como medio de cálculo geométrico en la Antigüedad fue importante tanto en la astronomía como en la navegación, contribuyendo al éxito de la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII.

Diremos más sobre esta rama de la matemática en el capítulo 7.

§4. Ecuaciones, álgebra

Los problemas matemáticos se basan en el conocimiento de las relaciones que existen entre diferentes magnitudes. Es, por ejemplo, necesario conocer la serie de los números naturales para descubrir el elemento desconocido de una proporción y hay que conocer la ecuación del movimiento —la velocidad es igual a la relación entre el espacio recorrido y el tiempo transcurrido— para calcular el valor de las variables que contiene, en este caso el espacio y el tiempo. Mientras que la aritmética se limitaba al cálculo elemental, el álgebra, desarrollada especialmente por los árabes —testigo de tal relación es el propio nombre: «álgebra» significa «recomposición» o «reintegración»—, sustituía los números por letras para operar sin necesidad de calcular. Las ecuaciones son igualdades que relacionan dos magnitudes o conjuntos de ellas. La razón entre la longitud y el radio de la circunferencia es igual a n ; y la proporción o igualdad de dos razones se expresa como $a/b = c/d$. Si multiplicamos cada numerador por el producto de los denominadores encontraremos que $a \times d = b \times c$.

Dada la igualdad que incluye una ecuación, es posible calcular el valor de cualquiera de sus elementos si conocemos los demás. La ecuación $a \times x = c \times b$ se resuelve al aislar la incógnita de uno de los términos mediante técnicas específicas, como la transposición de un término de una a otra parte de la igualdad, si al mismo tiempo se cambia el signo de la operación: menos si era más y viceversa. Fue al-Khwarizmi quien introdujo en el siglo X este tipo de procedimiento algebraico: la transposición de términos para eliminar las cantidades negativas $-x = 40 - 3x$ se convertía en $4x = 40$, y la sustitución $-15 + x^2 = 5x + 25$ en $x^2 - 5x = 10$.

La asociación de varias ecuaciones en un sistema permite calcular con varias incógnitas si se pueden formular tantas ecuaciones como incógnitas.

Las primeras ecuaciones se expresaron en forma literaria (álgebra retórica), la introducción de abreviaturas y símbolos es álgebra sincopada y con Diofanto apareció el álgebra simbólica, que no se generalizó hasta la introducción del

álgebra cartesiana. Las tablillas babilónicas del II milenio a. C. incluyen ejemplos de álgebra retórica que, en vez de una notación propia, utilizaban la descripción literaria. Los pitagóricos representaron los números mediante líneas, y Euclides recogió como proposiciones geométricas, «Si una línea recta se divide en dos partes cualesquiera, el cuadrado de esta línea es igual a la suma de los cuadrados de cada una de las partes y de los rectángulos formados por éstas», identidades algebraicas: $(a + b)^2 = a^2 + 2a \times b + b^2$. La *Aritmética* de Diofanto comprendía una teoría de los números algebraicos y 130 problemas de números racionales y positivos, resueltos mediante ecuaciones lineales y cuadradas, de los que sólo ofrecía los resultados. Por ejemplo, «Buscar tres números tales que la suma sea un cuadrado, lo mismo que la suma de dos de ellos», para el cual daba como solución 40, 80 y 320. Fue el primero en introducir una notación algebraica sincopada. En la India, Bramagupta (n. 598) encontró el medio de calcular la suma de cualquier número de elementos de una serie: de la de los enteros y positivos, de los cuadrados y los cubos de los anteriores, con sólo conocer el primero y último término y la diferencia entre uno y el siguiente (razón).

§5. Cosmología: el sistema geocéntrico

Kosmos era una de las denominaciones que los griegos usaban para referirse al Universo, «cosmogonía» era el relato de la creación divina, mientras que «cosmología» es un neologismo del siglo XVIII para referirse a la concepción global del Universo. Antes de que se crease la palabra se había escrito mucho sobre el tema utilizando los conocimientos astronómicos para construir un sistema del mundo. Los clásicos de la cosmología incluyeron a la Tierra entre los cuerpos celestes. Lo que distingue a la cosmología de la astronomía es el método del conocimiento: la observación en ésta y la especulación en aquélla. El uso que la cosmología hace del conocimiento astronómico producía hipótesis que se ofrecían como explicaciones de la naturaleza del mundo.

Los pitagóricos propusieron la idea de que tanto el cosmos como la Tierra eran esferas, figuras cerradas y perfectas cuyos puntos equidistan del centro. En el

centro de la esfera colocaron un gran fuego que no identificaron como el Sol, y en torno a él se movían en círculos concéntricos diez cuerpos celestes con velocidad uniforme: la Antitierra, que ocultaba el fuego a los humanos, la Tierra, la Luna, el Sol, cinco planetas y la esfera de las estrellas fijas. En el *Timeo*, uno de los últimos escritos de Platón, se incluye una versión de la creación, que atribuye al demiurgo, una figura mítica que no era divina ni humana. Las esferas cristalinas de Pitágoras y los cuatro elementos de Empédocles le brindaron los medios para describir el cosmos: un ser único, dotado de ánima, esférico y con un movimiento circular uniforme. Su opinión sobre la eternidad del cosmos depende de la interpretación que se haga del original. Un párrafo describe el mundo como totalidad: «El demiurgo lo ha compuesto de todo el fuego, todo el aire, de toda el agua y de toda la tierra y no ha dejado fuera del mundo ninguna parte de ningún elemento como tampoco ninguna cualidad».

Eudoxo de Cnido, que estudió algún tiempo con Platón, construyó una sofisticada descripción de las partes del cosmos —estrellas y planetas— y de sus movimientos en un escrito perdido (*De las velocidades*), del que sólo se conservan fragmentos y un comentario. Una cuestión planteada por Platón, en qué condiciones el movimiento uniforme de las esferas puede explicar los movimientos aparentes de los planetas, le llevó a construir el primer modelo geométrico del cosmos: imaginó tres esferas para describir el movimiento de la Luna y el Sol alrededor de la Tierra (sistema geocéntrico) y cuatro para los otros planetas. Con la esfera de las estrellas fijas llegó a un total de 27 esferas homocéntricas. El sistema no explicaba el movimiento retrogrado de los planetas, manifiesto para cualquiera que mirase al cielo. Aristarco de Samos (310-230 a. C.) aportó dos novedades, conocidas por una cita de Arquímedes, que resultaron ciertas a pesar del rechazo que merecieron a Aristóteles: la centralidad del Sol (sistema heliocéntrico) y la rotación de la Tierra para explicar el movimiento aparente de las estrellas.

Apolonio de Perge (c. 262-190 a. C.) complicó la descripción del Universo para explicar las irregularidades del movimiento, para «salvar las apariencias», mediante la introducción de dos novedades: el desplazamiento de la Tierra del centro del

Universo y la identificación de un punto equidistante al otro lado del centro geométrico (ecuante) desde el cual el movimiento era uniforme. Para explicar el movimiento retrogrado visible situó al planeta en un pequeño círculo (epiciclo) que se movía a lo largo de la órbita (deferente). Tres siglos después, Ptolomeo (c. 100-170) completó y sistematizó este modelo del mundo, que sobrevivió hasta el siglo XVI, en un texto al que los árabes dieron el nombre con que es conocido, *Almagesto* (*El más grande*). Fue la cumbre del sistema geocéntrico.



Universo geocéntrico en el Libro de la Cosmografía de Pedro Apiano

Aristóteles dedicó una de sus obras, el tratado *Acerca del cielo*, a la cosmología, que consideraba distinta de la astronomía. La composición del Universo y el movimiento de los cuerpos celestes eran los puntos que atraían su atención, junto a una caracterización inicial del cosmos como cuerpo perfecto, simple, único,

incorruptible, esférico lo mismo que los astros que lo forman, y lleno porque la naturaleza es incompatible con el vacío. Situó a la Tierra inmóvil en el centro del mundo y afirmó, de acuerdo con la impresión más inmediata, que todos los cuerpos giraban en torno a ella. Distinguió dos espacios dentro de la esfera celeste. El sublunar estaba compuesto por los cuatro elementos, tierra, agua, aire y fuego, cada uno de ellos con la tendencia a ocupar su «lugar natural»: la tierra abajo, el agua encima, en contra de la descripción que la hacía flotar sobre el océano, y el aire y el fuego por encima de ambos; de este modo explicaba la existencia de los continentes, los mares y la atmosfera. Por encima de la Luna situaba las esferas de los astros. La parte inferior del mundo era el lugar donde se producían los fenómenos astronómicos y meteorológicos. Por otra parte, el mundo supralunar estaba formado por una quintaesencia, o éter, que no tenía propiedades: no era caliente ni fría, ni húmeda ni seca. En esa zona supralunar se encontraban las esferas que transportan a los astros, cuyo número elevó a 47.

La teoría del movimiento refleja la distinción entre las esencias que forman las cosas: los cuerpos son simples o compuestos y «los movimientos de los cuerpos simples son simples, los de los compuestos son mixtos». Los cuerpos simples son los elementos que tienen un «lugar natural». En *Acerca del cielo* determinaba la naturaleza del movimiento y sus causas: «todas las cosas permanecen en reposo y se mueven por su naturaleza o por la fuerza, las que lo hacen por naturaleza son llevadas a un lugar en el que permanecen en reposo sin necesidad de ser obligadas [...]. Por el contrario, las que están o se mueven por la fuerza, permanecen en él por la fuerza».

§6. La aplicación del cálculo a la observación

La aplicación del cálculo a los fenómenos naturales abrió el camino que conducía a la ciencia, entendida ésta como un complejo sistema teórico- experimental. Arquímedes dio los primeros pasos con el estudio del equilibrio de los cuerpos (estática). Dar nombre a los fenómenos y describir sus caracteres es lo que hacía la observación, pero Arquímedes fue más allá al descubrir —lo expuso en el

Equilibrio de las figuras planas— la posición del centro de gravedad (baricentro) de las figuras regulares y explicar en función de éste el equilibrio de los cuerpos: estable, inestable e indiferente. La invención de la rueda, única o pareja, acoplada a un eje giratorio supuso la llegada de la primera máquina elemental. La cuña, de origen desconocido como la anterior, servía para dividir la madera y la piedra. Los demás artificios mecánicos, la palanca, el tornillo y la polea, se atribuyen a Arquímedes, que explicó su uso. La ley de la palanca se basa en la doctrina de las proporciones: el movimiento es proporcional a la fuerza aplicada y a la distancia entre el punto de aplicación y el de apoyo (fulcro). La mejor exposición de la ley se encuentra en la conocida frase que se le atribuye: «Dadme un punto de apoyo y moveré el Universo».

El arquitecto romano Marco Vitrubio (c. 70-15 a. C.) le atribuyó uno de los sucesos más conocidos de la historia, aunque confundiendo dos cosas distintas. Contó cómo Hierón de Siracusa sospechaba que el orfebre al que había encargado que fabricase una corona había utilizado menos oro del que había recibido para labrarla. Para comprobarlo sin destruir la obra de arte acudió a Arquímedes, que habría descubierto el principio de su nombre: «Si se sumerge en un fluido un sólido más pesado, se hundirá hasta el fondo y su peso disminuirá en una cantidad igual al peso del agua desplazada», principio que se encuentra en su tratado *De los cuerpos flotantes*. El problema planteado tenía una solución elemental, bastaba con sumergir los dos platos de la balanza en un recipiente lleno de agua, el primero con la corona y el segundo con el lingote del metal, para ver como éste se sumergía más profundamente. El relato de Vitrubio planteaba en realidad un problema distinto, el de la densidad de las distintas materias, voz que los romanos usaron para referirse al espesor.

§7. La especulación médica

Otro de los grandes dominios en el que la especulación se manifestó pronto fue en el de la curación de enfermedades y el tratamiento de heridas o traumas. Y fue precisamente el hecho de que la especulación se introdujese en este campo lo que

permite hablar plenamente de medicina en época temprana. El primer texto médico del que se tiene noticia en el que aflora un cierto sistema especulativo-organizativo es *Sobre la naturaleza*, que tuvo como autor a Alcmeón de Crotona (c. 500 a. C.), localidad situada en el sur de la actual Italia. De él sólo se han identificado algunos fragmentos. «Lo que conserva la salud», se lee en aquella obra, «es el equilibrio de las potencias: de lo húmedo y lo seco, de lo frío y lo caliente, de lo amargo y lo dulce, etc., pero el predominio de una entre ellas es causa de enfermedad; pues el predominio de cada opuesto provoca la corrupción». Considerado como el primer anatomista, es posible que la experiencia de Alcmeón se limitase a la extracción del globo del ojo de un animal y a la observación de los vasos (del nervio óptico) que apuntan hacia el cerebro. Según Teofrasto fue el primero en distinguir entre percepción y comprensión, lo que le permitió diferenciar entre animales y humanos. La conclusión más relevante decía: «Todos los sentidos están, de una u otra forma, conectados con el cerebro».

Una de las manifestaciones más notorias de la especulación en la medicina antigua se encuentra en la presencia de los filósofos en la medicina griega. Que se ocupasen también ellos de la medicina es algo que podemos entender teniendo en cuenta la incapacidad de encontrar respuestas satisfactorias a las cuestiones que surgían en el contexto médico. Si a esta incapacidad añadimos, por un lado, la dimensión integradora y la ambición explicativa de la medicina griega y, por otro, que fue entonces, en el mundo helenístico, donde surgió la filosofía con el objetivo de, precisamente, proporcionar sistemas integradores explicativos, entonces podemos comprender con cierta facilidad que durante siglos los escritos filosóficos compitieran con escritos médicos por el conocimiento de la *physis* humana, cada uno desde su particular punto de vista. Describir la constitución normal del sujeto para apreciar los síntomas de la enfermedad fue la aportación de los segundos, en tanto los primeros construían sistemas globales.

Entre los ejemplos más notorios de los filósofos cuyas doctrinas influyeron en la medicina destacan tres: Empédocles de Agrigento, Platón y Aristóteles. Sanador al mismo tiempo que filósofo, como ya señalamos, Empédocles formuló la doctrina

presocrática según la cual todos los seres naturales están compuestos por una mezcla en proporciones variables de cuatro elementos de cualidades opuestas (agua, aire, tierra y fuego), una doctrina que mantuvo su influencia durante prácticamente dos milenios, tanto en la medicina como en la química (campo este último en el que recibió el golpe de gracia, de manos de Lavoisier). Por su parte, Platón defendió la idea, expresada con anterioridad en estas páginas, de la existencia de tres sistemas corporales — corazón, hígado y cerebro— conectados también a los estados mentales. Pero sus aportaciones en el campo de la especulación médica no se pueden comparar a las de Aristóteles, su discípulo, uno de cuyos grandes intereses, según vimos en el capítulo anterior, fue la observación de los seres vivos, si bien el filósofo-científico que había en él no podía contentarse con enumerar y describir, y así nos encontramos con esquemas organizativos; esto es, especulativos. La abundancia de datos anatómico-biológicos que aparecen en los textos aristotélicos no debe llevarnos a pensar, en efecto, que éstos eran su objetivo principal, pues no olvidó en absoluto que, una vez identificados «los caracteres distintivos y los atributos comunes», había que «intentar descubrir las causas». Y no perdamos de vista que para Aristóteles el concepto de «causa» era diferente al nuestro: incluía, por ejemplo, no sólo la causa eficiente, sino también la causa final, de ahí que caractericemos el sistema que pretendía descubrir en el mundo natural como teleológico. Eso sí, negaba que la naturaleza actuase con algún propósito consciente, o, si se prefiere decir así, que existiese una inteligencia divina que controlase desde afuera los cambios de la naturaleza. Si existe una finalidad en los procesos naturales (biológicos o no), ésta es inmanente a los objetos mismos, a los animales y plantas que viven y crecen: la semilla de una planta crece hasta convertirse de forma natural en el ejemplar maduro, y el niño hace lo mismo hasta llegar a ser un adulto.

De acuerdo con la doctrina de las causas, Aristóteles organizó sus observaciones ayudándose de dos conceptos: el de órgano y el de sistema. Concebía el órgano como una asociación de materia y función. Se caracterizaba por ocupar una posición determinada en el cuerpo y un contorno que lo definía, mientras que su

función se descubría mediante la observación de los fenómenos. Los órganos principales se encontraban en las cavidades corporales: cefálica (cerebro), torácica (corazón) y abdominal (hígado), aunque el número total fue cambiando al avanzar los conocimientos. El nivel siguiente de organización lo constituían los sistemas, compuestos de varios órganos, que participaban en una función determinada. El sistema respiratorio se consideraba compuesto entre otros órganos por los pulmones, el diafragma y los bronquios, mientras que el circulatorio lo estaba por el corazón y los vasos sanguíneos, y el nervioso por el cerebro, la médula espinal y los nervios. En principio, los sistemas se referían a las funciones, aunque había casos en que dos sistemas participaban de la misma función. Hoy sabemos que el organismo humano toma del exterior aire y alimentos para obtener el oxígeno y la glucosa necesarios para su actividad y pervivencia.



Galeno e Hipócrates, las autoridades de la medicina antigua

Como sucede en prácticamente todos los ámbitos del saber, los conocimientos médicos alcanzados en Grecia y Roma, que tuvieron a Hipócrates y Galeno como los representantes más distinguidos, recorrieron el mundo árabe, experimentando en este tránsito modificaciones y mejoras. La versión de los textos clásicos médicos comenzó con los abasidas. Hunayn ibn Ishaq (809-873), un nestoriano sirio que aprendió árabe, persa y griego, fue la figura dominante en la recepción de la cultura clásica. Tradujo al árabe y al sirio 116 títulos, entre ellos el *Timeo* de Platón, la *Metafísica* de Aristóteles y el Antiguo Testamento, y escribió 26 estudios médicos y una compilación de la mayoría de los escritos de Galeno, entre ellos siete cuyos originales se perdieron. Su aportación a la anatomía se encuentra en los *Diez tratados de oftalmología*, la primera obra especializada en la materia. Un persa, Al-Razi (865-925), racionalista y crítico frente a la religión y ante Galeno, al que dedicó una de sus obras (*Dudas sobre Galeno*), rechazó la doctrina de los humores y distinguió entre la viruela y el sarampión. Ibn Sina (987-1037), natural de Afshana, actualmente en Uzbekistán, y conocido en Europa como Avicena, fue un autor prolífico, un filósofo que se ocupó de la medicina. El *Canon de la medicina* es una enciclopedia escrita en árabe que se convirtió en la principal autoridad en la materia hasta el siglo XVIII. Destacó el papel de la anatomía para la medicina: «Con respecto a las partes del cuerpo y sus funciones, es necesario que se consideren a través de la observación y la disección». Amplió, asimismo, la teoría de los humores para explicar otros caracteres de la personalidad. Un árabe malequita, Ibn al-Quff (1233-1286), fue el editor de la mayor enciclopedia quirúrgica del islam, describió la conexión de las arterias y las venas a través de unos capilares invisibles y explicó la acción de las válvulas cardíacas en la circulación de la sangre, ideas todas ellas cuya verificación tendría lugar con el microscopio. Ibn al-Nafis (1213-1288), un médico sirio (nació en Damasco), sustituyó la versión galénica de la circulación pulmonar y publicó el primer tratado de oftalmología, *El libro comprehensivo del arte de la medicina*, pensado para 300 volúmenes, de los que escribió 80. Las aportaciones anatómicas, dispersas a lo

largo de la obra, restauraron el crédito de las ideas galénicas de los humores y los temperamentos.

Capítulo 3

El camino hacia la revolución científica. Verificarlo todo

Contenido:

- §1. *El sistema heliocéntrico*
- §2. *El valor de la precisión: Tycho Brahe*
- §3. *Las primeras leyes de la naturaleza*
- §4. *La observación telescópica*
- §5. *Más allá de Galeno: Vesalio*
- §6. *La fisiología*

§1. El sistema heliocéntrico

En el capítulo 2, al tratar de la especulación, introducimos el sistema geocéntrico, que sitúa a la Tierra en el centro del Universo, cuya máxima expresión se encuentra en el texto de Ptolomeo, *Almagesto*.

La renuncia a este sistema, el aristotélico-ptolemaico, fue una condición necesaria para que se produjese la Revolución Científica, el periodo de los siglos XVI y XVII en el que se establecieron las bases de la ciencia moderna. El punto de arranque para esa renuncia y este comienzo está vinculado al nombre de un canónigo y astrónomo teórico polaco, Nicolás Copérnico (1473-1543), y a un libro suyo, *De revolutionibus orbium coelestium* (*Sobre las revoluciones de los orbes celestes*), en el que defendía con buenos argumentos que era el Sol y no la Tierra el que se encontraba en el centro (o cerca) del Universo.

Antes de que Copérnico redactase su *Revolutionibus*, publicado el mismo año de su muerte (1543), había preparado un breve manuscrito, conocido como *Commentariolus*, en el que exponía sus hipótesis acerca de los movimientos celestes. Inédito en su tiempo, sabemos de la existencia de este sucinto tratado gracias a que se han localizado unas pocas copias de las que Copérnico debió enviar a diversos astrónomos. Mientras que *De revolutionibus* era un exigente texto matemático, el contenido del *Commentariolus* era mucho más claro, como se

comprueba en la siguiente cita, en la que se encuentran los elementos básicos de la visión heliocéntrica (el Sol en el centro) del Universo, resumida en siete postulados:

1. No existe un centro único de todos los círculos o esferas celestes.
2. El centro de la Tierra no es el centro del mundo, sino tan sólo el centro de gravedad y el centro de la esfera lunar.
3. Todas las esferas giran en torno al Sol, que se encuentra en medio de todas ellas, razón por la cual el centro del mundo está situado en las proximidades del Sol.
4. La razón entre la distancia del Sol a la Tierra y la distancia a la que está situada la esfera de las estrellas fijas es mucho menor que la razón entre el radio de la Tierra y la distancia que separa a nuestro planeta del Sol, hasta el punto de que esta última resulta imperceptible en comparación con la altura del firmamento.
5. Cualquier movimiento que parezca acontecer en la esfera de las estrellas fijas no se debe en realidad a ningún movimiento de ésta, sino más bien al movimiento de la Tierra. Así pues, la Tierra —junto a los elementos circundantes— lleva a cabo diariamente una revolución completa alrededor de sus polos fijos, mientras la esfera de las estrellas y último cielo permanece inmóvil.
6. Los movimientos de que aparentemente está dotado el Sol no se deben en realidad a él, sino al movimiento de la Tierra y de nuestra propia esfera, con la cual giramos en torno al Sol exactamente igual que los demás planetas. La Tierra tiene, pues, más de un movimiento.
7. Los movimientos aparentemente retrógrados y directos de los planetas no se deben en realidad a su propio movimiento, sino al de la Tierra. Por consiguiente, éste por sí solo basta para explicar muchas de las aparentes irregularidades que en el cielo se observan.

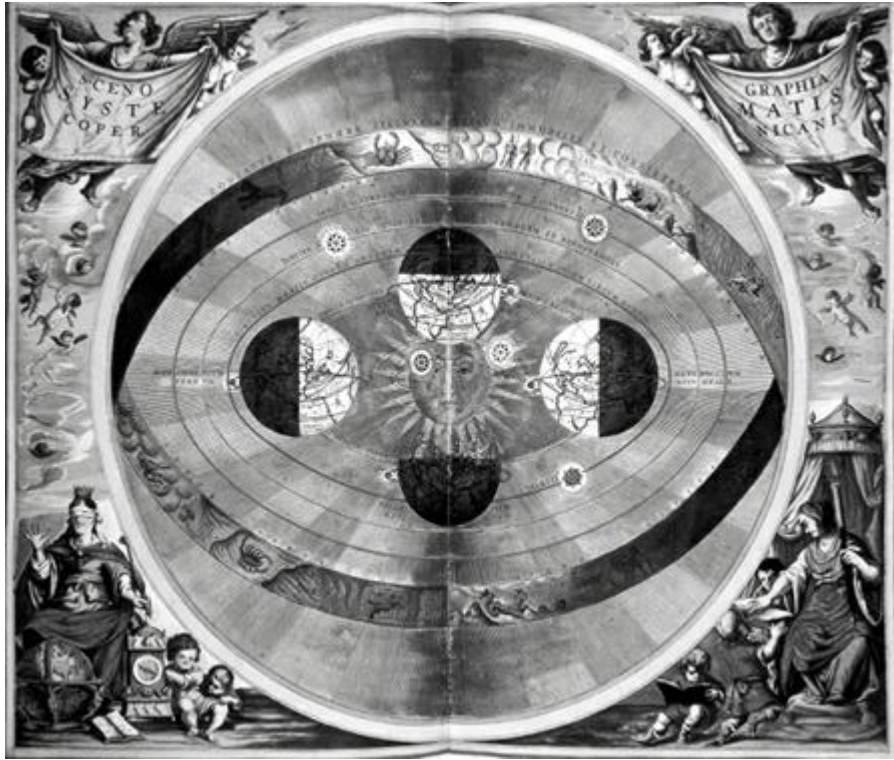
De esta manera, el Universo quedaba organizado de la siguiente forma:

Las esferas celestes se inscriben unas dentro de otras según el orden siguiente. La superior es la esfera inmóvil de las estrellas fijas, que contiene a todas las demás cosas y les da un lugar. Inmediatamente después se encuentra la esfera de Saturno, seguida por la de Júpiter y, a continuación, por la de Marte. Debajo de ésta se halla la esfera en la que nosotros giramos, a la cual siguen la esfera de Venus y, finalmente, la de Mercurio. La esfera lunar, por su parte, gira en torno al centro de la Tierra y es arrastrada con ella a la manera de un epiciclo. Idéntico orden guardan asimismo las velocidades de revolución de las esferas, según sean mayores o menores los círculos que trazan. Así, el periodo de revolución de Saturno es de treinta años, de doce el de Júpiter, dos el de Marte, un año el de la Tierra, nueve meses el de Venus y tres el de Mercurio.

Da idea de la dificultad que implicaba aceptar la tesis de Copérnico el prefacio «Ad lectorem» con el que comenzaba el libro, que aparecía sin firmar y que no se debió a Copérnico, sino a la pluma del teólogo protestante Andreas Osiander (1498-1552), el corrector de las pruebas y, en este sentido, responsable de la edición de la obra, quien lo incluyó sin que, por lo que sabemos, lo autorizase Copérnico. La opinión que sostenía allí Osiander —«no espere nadie», escribía, «en lo que respecta a las hipótesis, algo cierto de la astronomía, pues no puede proporcionarlo»— no apoyaba la idea de que realmente el sistema heliocéntrico fuese cierto, sino que lo entendía como un mero instrumento de cálculo; al aparecer este texto introductorio sin firma, su contenido fue tomado, inevitablemente, como el punto de vista del propio Copérnico.

¿Por qué incluyó Osiander aquella nota para los lectores de *De revolutionibus*? ¿Porque creía realmente que las matemáticas no son más que un instrumento para describir la naturaleza, incapaces de revelar su verdadera esencia? ¿O porque temía la reacción de la Iglesia (católica o protestante; recordemos que Lutero no valoraba en mucho a Copérnico y sus ideas)? Limitándonos al caso de la Iglesia católica, lo único que es seguro es que *De revolutionibus* no suscitó la inmediata violenta

reacción que algo menos de un siglo después produciría el *Diálogo* de Galileo.



Sistema heliocéntrico de Copérnico

En efecto, el libro de Copérnico tardó en entrar en el *Índice de Libros Prohibidos*; fue en la sesión de la Congregación del Índice que tuvo lugar el 5 de marzo de 1616 cuando se decretó que «debía ser suspendido hasta que fuese corregido», una condena —motivada por el éxito que estaba teniendo Galileo en su defensa del sistema copernicano a partir de la publicación, en 1610, de su libro *Sidereus nuncius*—, por otra parte, relativamente suave (tengamos en cuenta que, en la misma sesión, el libro del padre carmelita Paolo Antonio Foscarini [c. 1565-1616] titulado *Lettera del R. Padre Maestro Paolo Antonio Foscarini Carmelitano, sopra l'opinione de' Pittagorici e del Copernico della mobilità della terra e stabilità del sole, et il nuovo Pittagorico sistema del mondo* [Nápoles, 1615] fue «prohibido y condenado totalmente»).

Independientemente de cuáles fuesen los motivos de Osiander, su prefacio saca a la

palestra un punto importante de la ciencia, uno que se han planteado a lo largo de la historia un buen número de filósofos (como Kant) y científicos: el de si las teorías que construyen los científicos y que explican los fenómenos naturales observados (entendiendo por «explicar» reunir grupos de ellos en un sistema formal y ser capaces de predecir sucesos futuros) representan fielmente la realidad o son, tan sólo, imágenes formales, sombras platónicas que no nos proporcionan más que imágenes deformadas de la realidad. Importante como es esta cuestión, en última instancia no afecta al propósito último de la ciencia, que es predecir lo que va a suceder. Si lo que nos da son únicamente sombras, de lo que no cabe duda es que son sombras muy hábiles, puesto que mantienen una extraordinaria coherencia interna entre ellas.

Por lo que se refiere a las opiniones del propio Copérnico, si nos atenemos al «Prefacio al Santísimo Señor Pablo III, Pontífice Máximo», que él mismo escribió y que seguía al «Prefacio» de Osiander, parece que sí se inclinaba a pensar en la realidad última del sistema heliocéntrico.

§2. El valor de la precisión: Tycho Brahe

En contra de la leyenda que pervivió durante mucho tiempo, el libro de Copérnico fue leído con atención por la mayoría de los astrónomos de su tiempo, y también por los que siguieron inmediatamente. Pero esto no fue suficiente para que la tesis que defendía, la heliocéntrica, se impusiera, entre otros motivos porque Copérnico no desarrolló una dinámica que hiciera plausible la idea de una Tierra en movimiento: si esto era así, si la Tierra estaba, efectivamente, en movimiento, ¿cómo era posible que los objetos libres no se alejaran de la superficie terrestre?, ¿por qué no se veía que las nubes siempre se dirigían hacia el oeste y los cuerpos arrojados desde una torre no caían al oeste de la base de la misma? Había, en definitiva, que crear una ciencia del movimiento en la que tuviese cabida la noción de sistemas que mantenían su estado de movimiento si no eran sometidos a algún tipo de «nueva influencia», algo que llevarían a cabo sobre todo Descartes, Galileo y Newton.

Un ejemplo notable de las dificultades que las tesis copernicanas encontraron para imponerse es el del danés Tycho Brahe (1546-1601), al que se considera habitualmente el más grande de los astrónomos anteriores a la invención del telescopio.

En 1572, Brahe tuvo la oportunidad de observar un raro fenómeno astronómico: la aparición de una nueva estrella, una nova (hoy sabemos que se trató de una supernova). La noche del 11 de noviembre de 1572, observó, cerca del cenit en Casiopea, una estrella de una extraordinaria luminosidad, que por su brillo se podía comparar a Venus. Sólo fue a partir de diciembre cuando comenzó a disminuir el brillo de la nueva estrella, que desaparecería finalmente de la vista en marzo de 1574.

Gracias a un sextante que él mismo había construido, pudo medir con precisión la posición de la nova, determinando que se encontraba muy lejos, ciertamente más allá de la esfera lunar que, según el modelo aristotélico-ptolemaico, marcaba la frontera a partir de la cual no había cambio. Pero la nova mostraba todo lo contrario: que también allí los cuerpos celestes cambiaban.

Brahe no fue el único que observó esta supernova. En España la estudió Jerónimo Muñoz, catedrático de Hebrero y Matemáticas de la Universidad de Valencia, y luego de Astrología en Salamanca. En 1573, y a petición de Felipe II, Muñoz publicó un libro detallando sus observaciones, *Libro del nuevo cometa, y del lugar donde se hace, y cómo se verá por las paralajes cuán lejos está de tierra; y del pronóstico de éste*, que al año siguiente ya se había traducido al francés.

También Tycho hizo públicas sus observaciones a través de un libro: *De nova stella et nullius aeri memoria primus visa* (1573). Y con él alcanzó una cierta notoriedad, lo que, unido a sus buenas relaciones, propició que el rey Federico II le cediese la isla de Hven, situada en el estrecho de Sund, que separa Dinamarca de Suecia, donde levantó un palacio-ciudadela cuya primera piedra se puso en agosto de 1576: Uraniburgo, la ciudad de las estrellas.

Uraniburgo terminó contando con las mejores instalaciones astronómicas de su tiempo: varios edificios con diferentes observatorios (en 1584 construyó uno fuera

de la ciudadela: Stiernburgo), imprenta, biblioteca y laboratorios químicos. Y, por supuesto, con los mejores instrumentos astronómicos de la época: cuadrantes, esferas armilares (zodiacales y ecuatoriales), arcos bipartidos para captación de distancias astrales menores, semicírculos, ballestillas (o radio astronómico), reglas paralácticas (un instrumento conocido como las «reglas de Ptolomeo», que constaba de tres reglas que permitían medir muy ajustadamente las distancias de las estrellas a partir del polo y, por tanto, sus alturas), sextantes astronómicos y también — aunque reconociendo que le servía de poco— el antiguo astrolabio. Asimismo, dispuso de un gran cuadrante mural.

La atención que Tycho Brahe dedicaba a los instrumentos nos da la excusa para hacer hincapié en la importancia que éstos poseen, en general, para el desarrollo científico. En el caso de la astronomía, recordemos, por ejemplo, la relevancia, casi podríamos decir la omnipresencia, del astrolabio (etimológicamente, «portador de estrellas»), un instrumento plano y circular que representa una proyección estereográfica del globo y del hemisferio de los cielos, empleado, por ejemplo, para hallar la altura de un astro o encontrar la posición del Sol en el Zodíaco según la fecha, y que al parecer fue creado por filósofos y astrónomos griegos (posiblemente Hiparco de Nicea en el siglo II a. C.) antes de la era cristiana, y cuyo uso se prolongó en Europa hasta el siglo XVII y en algunos países islámicos hasta el XX (los más antiguos conocidos fueron producidos en talleres sirios en el siglo IX). Asimismo, aunque más tardío, el cuadrante (nombrado así por su figura, un cuarto de círculo dividido en ángulos de 0 a 90 grados) constituyó una ayuda muy importante: en *Almagesto*, Ptolomeo describía uno que utilizó para medir la altitud del Sol.

En Hven pudo dedicarse Brahe sin preocupación durante cuatro lustros a la observación de los movimientos estelares, con el fin de confeccionar unas tablas astronómicas, que publicó en 1627 Kepler, las *Tablas rudolfinas*. El seguimiento que Brahe hizo del gran cometa de 1577 puso en evidencia la cosmología aristotélica: al igual que la nova de 1572, los movimientos de los cometas se producían mas allá de la Luna, con lo que las esferas cristalinas que se suponía

llevaban a las órbitas fueron las primeras víctimas, puesto que los cometas las atravesarían (al menos la de la Luna). Ahora bien, en lugar de asumir el modelo copernicano, Tycho optó por otro de, digamos, transición, uno que recordaba algunos aspectos del de Heráclito, pero ahora con todos los planetas (salvo la Tierra), y no sólo Venus y Mercurio, orbitando en torno al Sol.

La muerte del rey y las diferencias con su sucesor, Christian IV, que subió al trono en 1596 y suprimió en 1597 la asignación anual que había estado recibiendo, condujeron a Brahe a abandonar Hven y Dinamarca, para instalarse finalmente en 1598 en el castillo de Benatek, 35 km al noreste de Praga, como astrónomo real o matemático imperial del emperador Rodolfo II (1552-1612). A la vista de su fecha de fallecimiento (1601), es evidente que no tuvo mucho tiempo para profundizar en sus observaciones astronómicas. Sin embargo, una de sus actuaciones allí tendría enormes repercusiones en el futuro: el 9 de diciembre de 1599, Brahe escribía a Johannes Kepler (1571-1630), entonces en Gratz, expresándole su deseo de que trabajase con él.

§3. Las primeras leyes de la naturaleza

Kepler aceptó la oferta y llegó a Praga en febrero de 1600. Antes de instalarse en la ciudad, en 1596, había publicado un libro, *Mysterium cosmographicum*, decididamente copernicano, en el que presentaba su idea del Universo como un sistema de esferas encajadas (tangentes a los vértices) en los cinco poliedros regulares reconocidos: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro.

A la muerte de Brahe, Kepler heredó no sólo su puesto de matemático imperial, sino también sus tablas astronómicas. Con los datos incluidos en éstas, se dedicó sobre todo a estudiar el aparentemente errático movimiento de Marte, que había obligado, con sus movimientos retrógrados, a introducir la idea de epiciclo. Amplió, además, su estudio al movimiento de la Tierra y descubrió que aumentaba su velocidad al acercarse al Sol y disminuía al alejarse. A continuación, extendió la investigación para calcular las áreas de los triángulos que formaban el Sol y dos posiciones sucesivas del planeta, mediante la aplicación del método de exhaustión

introducido por Eudoxo y seguido por Arquímedes. Es necesario, asimismo, señalar que Kepler fue uno de los primeros astrónomos que utilizó en sus cálculos los logaritmos. Sumergido en cientos y cientos de datos astronómicos, ciertamente necesitaba un instrumento de cálculo algorítmico como aquél.

La comparación con los resultados observacionales llevó a Kepler a formular la que hoy se conoce como segunda ley, cuya versión actual establece que «en el movimiento planetario, los radio vectores barren áreas iguales en tiempos iguales». El cambio de velocidad a lo largo de la órbita era incompatible con la concepción circular, y el estudio de las cónicas realizado en el siglo III a. C. por Apolonio de Perga le llevó a la conclusión de que las orbitas eran elipses en las que el Sol ocupaba uno de los polos (primera ley). Formuló así las primeras leyes generales de la naturaleza, que presentó públicamente en un libro que vio la luz en 1609: *Astronomía nova (Nueva astronomía)*. En él describía los sistemas ptolemaico, tychónico y copernicano, introducía las orbitas elípticas e incorporaba la descripción que el médico y filósofo natural inglés William Gilbert (nos volveremos a encontrar con él en otro capítulo) hizo en 1600 de la Tierra como un imán, para explicar la atracción del Sol (Kepler pensaba que, al girar el Sol sobre su eje, emitía luz y energía magnética que mantenía a los planetas en sus orbitas). El sistema kepleriano describía el cosmos como una elipse, casi plana, con el Sol en uno de sus polos, que era el centro de una fuerza de atracción que movía a los planetas. Completó su obra con la publicación en 1619 de otro libro, *Harmonices mundi (Armonías del mundo)*, en el que aparecía una tercera ley: «los cuadrados de los tiempos de revolución de dos planetas cualesquiera son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al Sol». En *Harmonices*, la tercera ley aparecía enunciada, pero prácticamente sin ningún comentario, limitación que fue subsanada en un libro de carácter más general, que apareció en dos partes entre 1620 y 1621, *Epitome astronomiae Copernicanae (Epítome de astronomía copernicana)*, donde recibió una amplia justificación teórica.

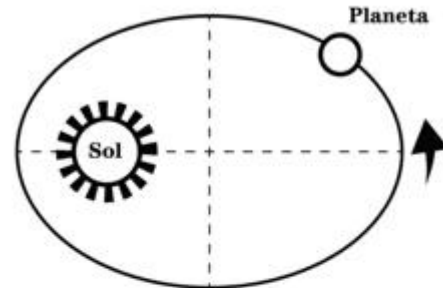
Las tres leyes de Kepler muestran relaciones cuantitativas obtenidas mediante prueba y error, y aplicadas luego como datos para verificar la hipótesis, un

procedimiento ciertamente moderno, aunque coexistiese con otros que lo eran menos. Y es que en cuanto a modelos teóricos, Kepler se movió en territorios a los que en la actualidad en modo alguno aplicaríamos tal calificativo. Cuando hablaba, como en su libro de 1619, de «armonías del mundo», lo hacía casi literalmente; así, entre los objetivos de la obra se encontraban, utilizando sus propias palabras, los siguientes: «en qué cosas tocantes al movimiento de los planetas hállanse expresadas por el Creador las proporciones armónicas, y de qué modo; cómo están expresadas en las proporciones de los movimientos planetarios las notas de la escala musical, o lugares del sistema, y los modos de armonía, mayor y menor; cómo se hallan expresados cada uno de los tonos o modos musicales en los movimientos planetarios». Debido a esta dimensión «metafísica» del pensamiento de Kepler, no podemos considerarlo plenamente como uno de los genuinos creadores de la Revolución Científica, aunque sin duda contribuyó a ella de diversas y muy notables formas, en especial desterrando de la astronomía las esferas solidas, sustituyéndolas por orbitas elípticas, vacías la mayor parte del tiempo, de forma que no se conocieron casos de colisión entre las estrellas. Por primera vez, después de haber permanecido enquistados en el pensamiento astronómico-filosófico al menos durante dos milenios, los círculos dejaban paso a las elipses, un cambio que resultaría crucial para la formulación de la teoría newtoniana a finales de aquel siglo.

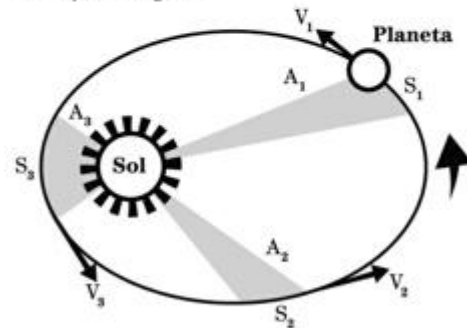
§4. La observación telescópica

LEYES DE KEPLER

1.ª ley de Kepler



2.ª ley de Kepler



3.ª ley de Kepler

$$\frac{R^3}{T^2} = Cte$$

Todo cambió con la introducción del telescopio, un instrumento cuya invención no fue consecuencia de la imaginación de los grandes teóricos, sino de artesanos como los holandeses Zacharias Janssen (1588-1638) y Hans Lippershey (1570-1619). Éste llegó a solicitar una patente, acción que provocó que otros dos holandeses, fabricantes de lentes (el nombre procede del latín *lens*, «lenteja», por la forma biconvexa de las lentes más comunes), Jacob Metius (c. 1571-1630), de Alcmaar, y Zacharias Jansen (1588-1638), de Middelburg, reclamaran la paternidad de la invención. Pero nadie hizo mejor uso científico de él que Galileo Galilei (1564-1642).

A comienzos del verano de 1609, Galileo supo, mientras se hallaba en Venecia, que en Holanda se había construido un antejo con el que se veían más cerca los objetos lejanos. He aquí cómo explicó en un libro del que enseguida hablaremos (*Sidereus nuncius*) el proceso de invención del catalejo:

Hace ya alrededor de diez meses me llegó un rumor de que un cierto neerlandés había fabricado un antejo, merced al cual los objetos visibles, aunque muy alejados del ojo del espectador, se veían nítidamente como si estuviesen cerca. Además, algunas experiencias de este efecto, ciertamente admirable, andaban de boca en boca, y mientras unos las creían, otros las negaban. Pocos días después, esa misma noticia la confirmó, por medio de una carta desde París, el noble galo Jacques Badovere [(1570-1610?), que fue discípulo de Galileo en Padua en 1598], lo que fue, al fin, la causa de que me implicase por entero en la busca de las razones, y también de idear los medios, por los cuales se llega a inventar un instrumento semejante, lo que conseguí poco después sustentándome en la teoría de las refracciones. En primer lugar, procuré un tubo de plomo y en sus extremidades adapté dos lentes, ambas con una parte plana, pero, por la otra una era esférica convexa y la otra, a su vez, cóncava. Luego, acercando el ojo a la parte cóncava vi los objetos bastante grandes y cercanos, pues aparecían tres veces más próximos y nueve veces más grandes que cuando se miran únicamente de forma natural. En seguida, me esforcé en hacer otro más

exacto, que representaba los objetos más de sesenta veces más grandes. Al fin, sin ahorrar ningún esfuerzo ni coste, sucedió que fui capaz de construirme un instrumento tan excelente, que las cosas vistas por medio de él aparecen casi mil veces mayores, y más de treinta veces más próximas que si se mirasen sólo con las facultades naturales. Estaría de más exponer en qué medida y qué grande sería la utilidad de este instrumento, tanto en las necesidades terrestres como en las marítimas. Pero decidí olvidar las cosas terrenales y me dediqué a la observación de las celestes.

Científico de pura cepa, Galileo dirigió su telescopio, perfeccionado ya hasta llegar a los treinta aumentos, hacia el cielo. Y lo que vio allí cambió para siempre nuestra manera de contemplar y entender el Universo.

Lo primero que hizo fue dirigir su mirada hacia la Luna: «Hermosísimo y agradabilísimo es ver el cuerpo lunar», escribió en un breve libro que se apresuró a publicar en 1610, *Sidereus nuncius (Noticiero sideral)*, «alejado de nosotros casi sesenta semidiámetros terrestres, tan cerca como si distase tan sólo dos de esas medidas, de modo que el diámetro de la propia Luna parezca casi treinta veces más grande». Y lo que vio, utilizando el poder interpretativo de su mente, fue que «la Luna de ninguna manera está cubierta por una superficie lisa y pulida», como pensaban los defensores del antiguo sistema aristotélico-ptolemaico, «sino áspera y desigual; y que a semejanza de la faz de la propia Tierra se encuentra llena de grandes protuberancias, profundas lagunas y anfractuosidades».

Dirigió, asimismo, su catalejo hacia las estrellas fijas. Y lo primero que comprobó es que estos cuerpos celestes «de ningún modo parecen aumentar de tamaño en la misma proporción, según se incrementan los demás objetos, y también la propia Luna, sino que en las estrellas el aumento parece mucho menor: de tal manera que el catalejo, que podrá multiplicar los restantes objetos, por ejemplo, según una proporción de cien, se puede creer, que las estrellas apenas se convierten en cuatro o cinco veces más grandes». Ahora bien, los argumentos que daba para explicar este hecho son oscuros, no encontramos en ellos referencia a lo que es más

importante, la extrema distancia a la que se encuentran las denominadas «estrellas fijas», algo que las hace parecer puntos —«puntos de luz» que sufren distorsiones o centelleos, «fulgores postizos y accidentales» los llamaba Galileo— al atravesar la atmósfera terrestre. Pero, independientemente de esto, lo que el antejo galileano sí permitía era ver estrellas que por su menor magnitud no era posible observar a simple vista.

Con el catalejo hemos de ver, más allá de las estrellas de sexta magnitud, una numerosa grey de otras que se escapan a la visión natural, lo que cuesta trabajo creer: permitirnos ver más estrellas, incluso, que cuantas están en todos los otros seis grados de magnitud. Las mayores de éstas, aquellas que podríamos llamar de séptima magnitud, o de primera magnitud de las invisibles, gracias al catalejo se muestran más grandes y más brillantes, que los astros de segunda magnitud vistos a simple vista.

El Universo, el en realidad pequeño Universo de los antiguos, se ampliaba, mostrando que albergaba un número mucho mayor de cuerpos que los imaginados hasta entonces.

Y si se observan los cielos, ¿cómo no dirigir la mirada hacia esa franja lechosa que llamamos Vía Láctea? Galileo lo hizo, claro, y esto es lo que anotó en *Sidereus nuncius*:

Lo que, en tercer lugar, observamos fue la materia y naturaleza del propio CÍRCULO LÁCTEO, que nos fue permitido escrutar con nuestras facultades merced al catalejo, de modo que todas las discusiones, que a lo largo de los siglos torturaron a los filósofos, fueran resueltas con la certidumbre de nuestros ojos, viéndonos también liberados de la palabrería. En efecto, la GALAXIA no es otra cosa que un montón de innumerables estrellas esparcidas en grupos.

Comprobó, asimismo, Galileo que no sólo en lo que ahora sabemos que es nuestra galaxia se veía un «esplendor lácteo» que escondía innumerables estrellas, sino que

«muchas más áreas de color semejante brillan esparcidas por el éter», y que, al dirigir el telescopio «a cualquier lado que quieras de ellas, darás con un montón de estrellas amontonadas unas encima de otras. Además (lo que causa más asombro) las estrellas, llamadas hasta hoy en día por todos los astrónomos NEBULOSAS, son aglomeraciones de estrellitas esparcidas de un modo extraordinario».

Finalmente, en la parte más extensa y detallada de *Sidereus nuncius* anunciaba otro de sus descubrimientos, «cuatro PLANETAS nunca vistos desde el comienzo del mundo hasta nuestros tiempos». Explicaba:

El día siete de enero del presente año 1610, en la primera hora de la noche siguiente, mientras yo contemplaba los astros celestes a través del antejo, apareció Júpiter, y puesto que yo tenía dispuesto un instrumento suficientemente excelente, comprobé (cosa que antes en absoluto me había sucedido por la debilidad del otro aparato) que lo acompañaban tres estrellitas, pequeñas en verdad, pero no obstante clarísimas, las cuales, aunque se considerasen en el número de las fijas, me produjeron no poco asombro, por el hecho de que parecían dispuestas exactamente en una línea recta y paralela a la eclíptica.

Desde aquel 7 de enero prosiguió con sus observaciones —64 en total—, finalizándolas el 2 de marzo. En un principio no se preocupó «en absoluto de la distancia entre ellas y Júpiter, pues [...] al principio se consideraron fijas. Mas, cuando el día ocho volví a la misma observación, no sé si guiado por el destino, hallé una configuración muy distinta». Tras continuar observando, llegó a la conclusión de que giraban en torno a Júpiter, «un argumento eximio y único», escribió,

para quitar los escrúpulos de aquellos que, aceptando de buen grado el movimiento de los Planetas alrededor del Sol en el sistema copernicano, se enervan de tal modo por el movimiento de sólo la Luna alrededor de la Tierra, mientras que ambas dibujan una completa órbita circular anual alrededor del Sol, que piensan que esta estructura del universo tiene que ser

rechazada como imposible.

Ya publicado *Sidereus nuncius*, Galileo advirtió la existencia de manchas en el Sol. Naturalmente, observaciones de este tipo no se pueden realizar directamente. Para enfrentar el problema, lo que hizo al principio fue colocar una lente neutra de color azul o verde sobre el objetivo del telescopio, o cubrir la lente con hollín. Sin embargo, un antiguo discípulo de Galileo, Benedetto Castelli (1578-1643), encontró un método mejor: dirigir la imagen del Sol hacia una pantalla colocada detrás del telescopio. De esta manera, Galileo pudo observar las manchas sobre la superficie solar, experiencia que recogió en 1613 en un libro titulado *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari (Historia y demostraciones sobre las manchas solares)*. Era una prueba más de la no inmutabilidad de los cielos.

Durante los siguientes años, la fama de Galileo fue aumentando... y también los problemas asociados a la tesis copernicana que defendía, problemas —relacionados con la libertad de pensamiento— de los que nos ocuparemos en el siguiente capítulo. Baste ahora decir que, tras una primera condena en 1616, terminó arriesgándose (creía que la situación le favorecía) y publicando un libro inmortal que vio la luz en Florencia en 1632: el *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico, e Copernicano (Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, ptolemaico y copernicano)*, una obra maestra de la literatura científica, escrita en lengua vernácula, el italiano, en una época en que el latín era el idioma habitual en este tipo de textos. Los tres personajes creados por Galileo para protagonizar ese diálogo, Salviati (muchos consideraron que caracterizaba al papa Urbano VIII; esto es, a Maffeo Barberini), Sagredo y Simplicio, copernicano el primero (en realidad el *alter ego* de Galileo), neutral el segundo y aristotélico el último, han pasado a formar parte de la cultura universal.

El *Diálogo* constituye una hábil y detallada defensa del sistema heliocéntrico, que incluye, como veremos en el capítulo siguiente, argumentos relativos a los sistemas dinámicos. Queremos hacer notar, sin embargo, que, como por otra parte era natural, no siempre Salviati conseguía salvar todas las objeciones que le planteaba

Simplicio. Una de éstas era la de la ausencia de observaciones de paralaje. Si la Tierra se movía, entonces, al variar mucho su posición a lo largo del año, deberían observarse diferencias en las posiciones de las estrellas fijas. Durante la tercera jornada, ante el comentario de Simplicio de que, si no se observa ningún paralaje, habría que «confesar que nulo es el movimiento anual por el orbe magno atribuido a la Tierra», Salviati tenía que aceptar finalmente que «incluso en el caso de que eso no se percibiera sensiblemente, no por ello se elimina la movilidad ni se concluye necesariamente la inmovilidad, pudiendo suceder (como afirma Copérnico) que la inmensa distancia de la esfera estrellada haga inobservables tales mínimas diferencias».

Aunque algunos como Kepler en *De cometis* sostuviesen que «la astronomía ptolemaica había descuidado hacer paralajes cada año, confiada en la opinión del vulgo de que la Tierra estaba fija y quieta en medio del mundo», el problema era real, y hubo que esperar mucho hasta que, efectivamente, pudieron medirse; hasta 1834, cuando el astrónomo y matemático alemán Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) anunció que había medido la distancia de una estrella (Cisne 61) midiendo previamente su paralaje.

§5. Más allá de Galeno: Vesalio

A partir de los siglos XV y XVI, la disección cobró un nuevo impulso, algo que se puede apreciar incluso en la pintura, donde se convirtió en un motivo frecuente de representación. Un ejemplo sobresaliente en este sentido es *La lección de anatomía* (1632) de Rembrandt (1606-1669), donde se ve al doctor Nicolaes Tulp, un famoso médico de Ámsterdam, explicando la musculatura del brazo a un grupo de cirujanos. De hecho, el interés de los humanistas por el individuo no se limitó al retrato, la propia especie se convirtió en objeto de observación.

Pero en ningún otro lugar la nueva ciencia anatómica se alió con el arte como en un libro del médico belga Andreas Vesalio (1514-1564), *De humani corporis fabrica*, publicado en 1543 (el mismo año en que apareció el *De revolutionibus* de Copérnico). En *La fábrica del cuerpo humano*, Vesalio realizó un vibrante

llamamiento en defensa de la práctica anatómica, de la disección, como base imprescindible para la comprensión de la estructura y funciones del cuerpo humano, e hizo hincapié en las limitaciones de los estudios de Galeno y en la degradación que la práctica anatómica había experimentado tras él. Es cierto que la aportación de Vesalio no significó, con respecto a la medicina galénica, una revolución tan marcada como la de Copérnico frente a la astronomía ptolemaica, pero sus enseñanzas y críticas resultarían imprescindibles para que en el futuro pudiese darse una revolución parecida.

Un punto esencial del libro de Vesalio era la crítica que en él se hacía a los médicos del pasado. Su desidia había sido tal, señalaba, que habían recogido

torpemente la doctrina de Galeno en libros voluminosos, sin apartarse ni una coma de él [...]. De tal manera han confiado todos en él, que no he encontrado ni un solo médico que piense que en los libros de anatomía de Galeno se ha encontrado alguna vez ni el más ligero error y mucho menos que pueda encontrarse, si bien, aparte de que Galeno rectifica frecuentemente y varias veces señala los errores de unos libros en otros, al estar más preparado con el paso del tiempo, diciendo acto seguido lo contrario, ahora nos consta, basándonos en el renacido arte de la disección, en la lectura atenta de los libros de Galeno y en muchos lugares de los mismos aceptablemente corregidos, que él en persona nunca diseccionó un cuerpo humano recién muerto. Sin embargo, sabemos que, engañado por sus monos (aunque se le presentaron cadáveres humanos secos y como preparados para examinar los huesos),



frecuentemente criticaba sin razón a los médicos antiguos que se habían ejercitado en disecciones humanas. Puedes incluso encontrar en él muchísimas cosas que ha descubierto de manera poco ortodoxa en los monos. Además, resulta muy extraño que, a pesar de las múltiples diferencias existentes entre los órganos del cuerpo humano y los de los monos, Galeno no haya advertido casi ninguna salvo en los dedos y en la flexión de la rodilla, observación que sin duda hubiera omitido, lo mismo que las otras, si no fuera evidente sin necesidad de practicar la disección humana.

En más de doscientas ocasiones, advertía, se desviaban las explicaciones de Galeno de «la auténtica descripción de la armonía, del uso y de la función de las partes del cuerpo humano».

Vesalio, en resumen, introdujo una importante novedad, que ahora a nosotros puede parecer una trivialidad, pero que entonces no lo era: en vez de confiar a un matarife el despiece del cadáver mientras se leían los párrafos correspondientes de los clásicos, realizaba personalmente la disección.

§6. La fisiología

Para el estudio de seres como los humanos, la anatomía proporciona conocimientos acerca de su estructura estática, de, podríamos decir, su arquitectura. No informa, sin embargo, sobre los mecanismos que subyacen detrás de esos elementos estáticos. Continuando con esta analogía tomada de la física, la dinámica corresponde a otra rama de la medicina, la fisiología, que se ocupa de los procesos (físicos y químicos) que explican el funcionamiento —como algo no reducible a la estructura— de los seres vivos.

A pesar de la fuerte dependencia de la fisiología de otras ciencias, motivo por el que su gran desarrollo tuvo que esperar hasta el siglo XIX, también se encuentran disquisiciones fisiológicas en autores de la Antigüedad clásica. Recordemos que ya Hipócrates y Polibio incluyeron la sangre entre los humores, concibiéndola como

un fluido homogéneo, idea que no encontró alternativa hasta que en 1658 un joven microscopista holandés, Jan Swammerdan (1637-1680), descubrió los glóbulos rojos, que Leeuwenhoek describió en 1674, estimando su tamaño en 1/250.000 de un grano de arena.

Al igual que Aristóteles, William Harvey consideraba el corazón como el órgano más importante del cuerpo humano: en las primeras líneas de un libro, *Motu cordis*, del que trataremos enseguida, su autor escribía: «El corazón de los animales es el fundamento de la vida, el principio de todas las cosas, el sol del microcosmos; de él depende todo crecimiento y emana todo vigor y fuerza». Sede de la inteligencia, causa de la sensación y origen de los nervios y el movimiento, Aristóteles reducía el cerebro y los pulmones al papel secundario de ventilar el corazón. Galeno revisó algunas de estas opiniones, pero Avicena restableció otras en el siglo XI. Mientras que la atención a la composición de la sangre tuvo que esperar al desarrollo de la química, la circulación de aquella atrajo pronto el interés de los observadores, no en vano, hay que insistir en este punto, ocupaba un lugar central como uno de los cuatro humores médicos. Galeno creía que la sangre era producida en el hígado, desde donde se distribuía por las arterias y venas en una especie de movimiento de marea hacia los órganos, a los que llevaba el alimento necesario para su funcionamiento y donde era consumida. Argumentó, en concreto, que la parte de la sangre que se dirigía desde el hígado hacia el ventrículo derecho del corazón se dividía en dos cauces: uno que pasaba por la arteria pulmonar hacia los pulmones, y otro que atravesaba el septo (o *septum*, la pared o tabique que divide una cavidad o estructura en otras más pequeñas) del corazón a través de los «poros interseptales» invisibles, penetrando en la parte izquierda, donde se mezclaba con el aire (*pneuma*), calentándose y creando un «espíritu vital» que después se distribuía por todo el cuerpo. Consecuencia de sus ideas, concibió un sistema venoso separado del arterial, excepto en los poros del septo que dividían las dos mitades del corazón. La caracterización realizada por Galeno de la circulación sanguínea no fue cuestionada, por lo que sabemos, hasta que lo hizo en el siglo XIII Ibn al- Nafis, con quien ya nos encontramos, si bien la noticia de los trabajos de al- Nafis parece

haberse perdido, aunque puede (algunos así lo sostienen) que Servet hubiese accedido a una traducción de su libro. Nos estamos refiriendo al teólogo y médico español Miguel Servet (1511-1553), al que se le adjudica, más que a al-Nafis, el descubrimiento de la existencia de una «circulación menor» de la sangre a través de los pulmones; es decir, que la sangre no podía, como sostenía Galeno, pasar del ventrículo derecho al izquierdo, sino que debía transitar de alguna otra manera (la circulación menor, o pulmonar, constituye la parte del sistema circulatorio que transporta desde el corazón hasta los pulmones sangre desoxigenada que regresa luego oxigenada al corazón). Aunque se basó en consideraciones anatómicas (como la estructura del tabique pulmonar), para Servet la sangre tenía un interés especial, que iba más allá de «lo puramente material»: creía que era la sede del alma, insuflada a los seres humanos por Dios. Esta mezcla de teología y ciencia, que difundió en un libro de contenido fundamentalmente teológico, *Christianismi restitutio*, le costaría la vida, pues fue condenado por Calvino a ser quemado vivo por sus ideas heréticas (de su libro sólo se salvaron tres ejemplares).

Fue el médico inglés William Harvey (1578-1657), otro de los protagonistas de la Revolución Científica, quien más se distinguió en el estudio de la circulación de la sangre, disciplina a la que otorgó el que probablemente fuera su mayor impulso hasta el siglo XIX.

Como tantos otros, Harvey estudió medicina en Italia, en la Universidad de Padua, donde se doctoró en 1602. De regreso a Inglaterra, destacó lo suficiente como para llegar a ser médico de cámara del rey Carlos I. En 1615, el Colegio de Médicos de Londres le encargó que dictase un curso sobre anatomía (las *Lumelian Lectures*), que constituyó el germen del que brotaría trece años más tarde su gran libro: *Exercitatio anatómica de motu cordis et sanguinis in animalibus* (*Una disquisición anatómica relativa al movimiento del corazón y la sangre en los animales*, de 1628). *De motu cordis*, como es habitualmente denominado, es un texto fundacional de la fisiología moderna. En él, y mediante una serie de disecciones y experimentos, Harvey describió el corazón como un músculo que se contrae y se dilata, y explicó la circulación de la sangre como el resultado del impulso recibido

por la dilatación de las arterias cuando se contrae el corazón. Demostró, asimismo, que las válvulas del corazón, de las arterias y de las venas están dispuestas en un solo sentido, y que aquél, durante la sístole, se contrae como si fuese una bomba muscular que expelle sangre. También observó que el ventrículo derecho sirve a las necesidades de flujo sanguíneo de los pulmones, mientras que el izquierdo atiende a las del sistema arterial, comprobando que la sangre circula a través de las venas en dirección al corazón. Con tales resultados, unidos al cálculo de la cantidad de sangre bombeada, concluía que la sangre, efectivamente, circulaba, aunque, al no disponer de microscopio (un útil con el que sí contó Marcello Malpighi, de quien nos ocuparemos en otro capítulo, el de la célula), no consiguió demostrar cómo procedía el trasvase de la sangre arterial al sistema venoso.

Para llegar a este resultado, fue esencial que Harvey participara del nuevo espíritu científico, cuyo principal representante fue Galileo, un espíritu que buscaba cuantificar los fenómenos. Como acabamos de decir, Harvey calculó la cantidad de sangre bombeada en la acción cardíaca: peso de la sangre, pulsaciones por minuto y volumen por hora. El resultado que obtuvo era paradójico: «de una manera continua e ininterrumpida el pulso del corazón transmite la sangre de la vena cava a las arterias, en tan gran cantidad que no puede ser suministrada por los alimentos ingeridos», escribía en el capítulo IX («La existencia de la circulación de la sangre se deduce de la demostración de una primera tesis») de *Motu cordis*. Era, por consiguiente, necesario concluir en realidad la existencia de una cantidad menor, que circulaba por todo el cuerpo: «creo», señalaba, «que será manifiesto que la sangre efectúa un rodeo, una vuelta, siendo impulsada del corazón a las extremidades y regresando de las extremidades al corazón, y que así lleva a cabo una especie de movimiento circular».

El microscopio sería, por tanto, el instrumento necesario para avanzar en la tan compleja como sutil senda fisiológica. Que el camino era complejo es algo que, efectivamente, se comprueba fácilmente sin más que tener en cuenta la dificultad que implicaba el estudio de otro de los sistemas fundamentales de los cuerpos vivos: el sistema nervioso. Constituido por cerebro, medula espinal y nervios, su

análisis planteó especiales dificultades a la observación: el cerebro se descomponía al cabo de pocas horas, la médula espinal era de especial complejidad y se confundía con los ligamentos y los tendones. Galeno había concebido la médula como una prolongación del cerebro, de la que partían los nervios, que consideraba como tubos huecos destinados a transportar los espíritus (*dynameis*): el natural por el pneuma, el vital por la sangre y el aire, y el animal por el sistema nervioso. Las funciones específicas del sistema nervioso, la sensación y el movimiento, estaban regidas por distintos tipos de nervios: blandos y duros. Vesalio sustituyó la anatomía galénica, pero sin cambiar lo esencial de su fisiología.

El espíritu mecanicista que se desarrolló a partir de, sobre todo, el siglo XVII, hundía sus raíces en autores antiguos como Demócrito y se ajustaba bien al programa anatomista (al fin y al cabo, la estructura del cuerpo humano está determinada por el esqueleto y los músculos, que proporcionan la mitad del peso, y éstos eran conocidos en lo fundamental desde Vesalio; por otra parte, las articulaciones de los huesos y la contracción de los músculos determinan los posibles movimientos, más aún, el cuerpo humano es un sistema abierto que recibe del exterior los elementos necesarios para su mantenimiento: el aire por medio de la respiración y los nutrientes por la digestión, que, transformados en fluidos, circulan por todo el cuerpo). Este espíritu, del que participó Harvey en sus investigaciones sobre la circulación de la sangre, incidió también en la fisiología del cerebro, como muestra el caso de René Descartes (1596-1650), que atribuyó los movimientos nerviosos a unas partículas (*stmuli*) que al entrar en contacto con los terminales de los nervios originaban una secuencia de movimientos que conectaban a las fibras nerviosas. Las funciones del sistema nervioso seguían siendo la transmisión de sensaciones de la piel al cerebro y la determinación del movimiento. Mucho más específicas fueron las aportaciones de Thomas Willis (1621- 1675), *Sedleian professor* de Filosofía Natural en la Universidad de Oxford, pionero en el estudio de la anatomía del cerebro, así como de las enfermedades del sistema nervioso (en 1681 acuñó la voz «neurología» para describir la anatomía del sistema nervioso, y descubrió el denominado «círculo de Willis» del cerebro).

Lo primero que hay que señalar es que las ideas de Descartes sobre la vida deben enmarcarse en el conjunto de su obra, de su ambiciosa y globalizadora obra, que pretendía establecer un sistema universal en el que nada quedase excluido, una ambición que ya queda de manifiesto cuando se lee su *Discours de la méthode* (*Discurso del método*; 1637). Precisamente por esa pretensión globalizadora, Descartes no podía contentarse con tratar del cuerpo: tenía también que incluir, de alguna manera, al espíritu, presente de manera manifiesta en el hombre. La distinción entre cuerpo y espíritu procedía de los griegos, pero sólo con Descartes se planteó el problema de la relación entre ambos, si bien el filósofo francés mantuvo que el hombre era una excepción. Los animales eran como máquinas, objetivos puros para una anatomía y una fisiología, pero no así la especie humana. Los mejores textos para estudiar sus ideas al respecto son el citado *Discours de la méthode* y un libro que se publicó póstumamente, primero en latín, en 1662, y luego, en 1664, en francés, la lengua en el que fue escrito originalmente, titulado *Traité de l'homme* (*Tratado del hombre*; el retraso tuvo que ver con la condena de Galileo y los temores que esto produjo en el autor).

Las primeras líneas del *Traité de l'homme* muestran con claridad las opiniones de Descartes:

Estos hombres estarán compuestos, como nosotros, de un Alma y un Cuerpo. Es preciso que os describa, en primer lugar, el cuerpo, después el alma [...] y que, por fin, os muestre cómo deben estar ligadas y unidas estas dos naturalezas, para formar los hombres.

Supongo que el cuerpo no es otra cosa que una estatua o máquina de tierra, que Dios formó para que se parezca lo más posible a nosotros; de manera que no sólo le ha dado el color y la figura de todos nuestros miembros, sino que también ha puesto todas las piezas que son necesarias para que ande, coma, respire, para que, en definitiva, imite todas las funciones que se encuentran en nosotros y que se puede imaginar proceden de la materia, sin que dependan más que de la disposición de los órganos.

De manera similar, y más completa, aunque también haciendo más hincapié en el papel de Dios, en el *Discours de la méthode* encontramos elaboradas presentaciones relativas a la fisiología del cuerpo humano (la anatomía y la fisiología eran, desde este punto de vista, absolutamente necesarias para el gran programa filosófico-científico que aspiraba a desarrollar Descartes).

No parecerá en modo alguno extraño a los que, conociendo cuán diversos autómatas o máquinas capaces de moverse puede construir la industria humana con sólo emplear un pequeño número de piezas en comparación con la gran multitud de huesos, músculos, nervios, arterias y venas y todas las partes de cada animal, consideran este cuerpo como una máquina que, habiendo sido construida por las manos de Dios, está incomparablemente mejor ordenada y es capaz de realizar movimientos más admirables que ninguna de las que pueden ser inventadas por el hombre.

Habría sido difícil que Descartes no se formulara la cuestión de cómo interaccionan alma y cuerpo. La respuesta que daba a esta pregunta era que esa relación se produce en una glándula del cerebro humano, la pineal. Se trataba únicamente de una hipótesis que nunca pudo probar. El asunto era, como sabemos muy bien, demasiado complejo; de hecho, continúa, más de cuatro siglos después, sin ser resuelto completamente.

No obstante las grandes dificultades implícitas en los planteamientos cartesianos, y de forma parecida, aunque con menor intensidad, a lo que sucedió con su visión, mecanicista, del mundo, basada en vórtices (un tema este que trataremos más adelante), su tesis del hombre máquina no dejó de tener seguidores. Como el médico y filósofo francés Julien Offray de La Mettrie (1709-1751), quien intentó explicar en un libro que publicó con el transparente título de *L'homme-machine* (*El hombre máquina*; 1748) los fenómenos físicos en el hombre como resultado de los cambios orgánicos en el cerebro y en el sistema nervioso. Esta línea materialista tuvo otro de sus paladines en Paul Heinrich Dietrich, barón de Holbach (1723-1789).

Descubrir la fisiología del pensamiento —la facultad que distinguía a los humanos de los animales— era el problema fundamental. La concepción clásica de los espíritus y el alma personal de la doctrina cristiana daba una respuesta que, no obstante, era imposible de aceptar por ilustrados como Holbach, que asumieron completamente el gran principio: la transposición de la búsqueda de la verdad de la religión (a través de la revelación) a la ciencia (a través de la experimentación). Definir el problema y descubrir sus causas sería, como acabamos de decir, uno de los más difíciles problemas planteados a la ciencia.

Capítulo 4

La Revolución Científica. Todo se observa, todo se mide

Contenido:

§1. *El paso del tiempo*

§2. *Velocidad y movimientos*

§3. *La física del movimiento*

§4. *El método científico y las ciencias experimentales*

El término latino *revolvere* se usaba tanto para referirse a la marcha hacia atrás como a la vuelta al punto de partida después de recorrer una línea cerrada. En el siglo V san Agustín utilizó «revolución» para describir el movimiento de los cuerpos celestes que volvían al origen del movimiento. Copérnico lo empleó en el título de *De revolutionibus orbium coelestium* (1543) en esa última acepción, y Kant aludió a la «revolución copernicana» en el prefacio a la segunda edición de la *Crítica de la razón pura* (1787) para referirse a la introducción del heliocentrismo. Para entonces la palabra había adquirido un nuevo y más amplio significado, al utilizarse para designar las novedades políticas introducidas en el Reino Unido en 1688, la Revolución Gloriosa, y en 1789, los revolucionarios franceses introdujeron el determinante nacional: la Revolución Francesa. A partir de entonces fueron muchas las ocasiones para aplicarla con más o menos pertinencia. El uso del término para enfatizar otros acontecimientos, tan importantes como los políticos, explica su empleo por Paul Mantoux en 1905 para describir el cambio tecnológico y económico de finales del siglo XVIII como la Revolución Industrial.

El Renacimiento, la recuperación en el siglo XV de la cultura clásica, provocó el rechazo de la cultura medieval, cuya principal realización, la filosofía escolástica, se había limitado a sistematizar la lógica de Aristóteles. La ruptura entre la cultura clásica y el Renacimiento fue rechazada en el siglo XIX por los que concibieron la existencia de una continuidad entre los renacimientos medievales, carolingio, ottoniano y el del XII. El científico e historiador Pierre Duhem desarrolló esta tesis

en varios de sus libros, en especial en *La noción de la teoría física de Platón a Galileo* (1908), una «historia de las doctrinas cosmológicas de Platón a Copérnico», de la publicación de cuyos cinco primeros volúmenes se encargó personalmente. Allí escribió: «la mecánica y la física, de la que los tiempos modernos están comprensiblemente orgullosos, proceden, mediante una ininterrumpida serie de mejoras apenas perceptibles, de las doctrinas proferidas en el corazón de las escuelas medievales».

De manera más específica, en 1907 Ernst Cassirer identificó el momento decisivo de la historia de la ciencia, aquel en que la matematización del conocimiento de la naturaleza marcó el tránsito a la ciencia moderna. Es preciso, asimismo, mencionar a otros distinguidos estudiosos de lo que finalmente vino a denominarse «Revolución Científica». En primer lugar, a Alexander Koyre, quien no se interesó por la historia de la ciencia hasta 1934, cuando le encargaron una traducción de Copérnico. En 1940 publicó su primera contribución a la idea de una revolución científica en los *Estudios galileanos*, que recogían tres trabajos independientes: uno sobre Aristóteles y su revisión por los filósofos medievales, otro sobre la caída de los cuerpos en Descartes y Galileo, y por último el dedicado a la concepción de la inercia. Sostuvo sin ninguna prueba que los experimentos galileanos eran puramente virtuales, y su opinión se convirtió en doctrina común hasta que Stillman Drake tradujo los *Dialogos* en 1953, reprodujo los experimentos descritos por Galileo en el *Discurso* y verificó la exactitud de sus cálculos. Tras la Segunda Guerra Mundial, un historiador generalista, Herber Butterfield, impartió en Cambridge un ciclo de conferencias que recogió en 1949 en un libro, *Los orígenes de la ciencia moderna 1300-1800*, influido por Cassirer, en el que, como es patente desde el título, se supone que la verdadera revolución científica se desarrolló a lo largo de cinco siglos, tesis que rechazó cinco años después Rupert Hall, recortando la extensión a tres centurias en *La revolución científica 1500-1800*. Aun así, un periodo de tres siglos de duración no parece adecuado para una revolución, lo que plantea la necesidad de definir conceptualmente la naturaleza del suceso.

De eso, de «la naturaleza del proceso», trató Thomas Kuhn, un físico que abandonó

la investigación científica por la historia de la ciencia. Tras publicar un influyente libro, *La revolución copernicana* (1957), en 1962 sustituyó la investigación al uso por la construcción conceptual del proceso científico. En vez del desarrollo progresivo del conocimiento científico, imaginó un proceso de conocimiento que se repetía sin principio ni fin y cuyo punto de partida era la existencia de un cuerpo de doctrina que en un momento se considera como ciencia normal, asumida por el conjunto de la comunidad científica, al que denominó «paradigma». La aparición de resultados que no se ajustaban a la doctrina (anomalías) se resolvía mediante la ocultación del problema hasta el momento en que el paradigma resulta insostenible. Surgía entonces un nuevo paradigma, que asumían los jóvenes investigadores, más que los mayores, acostumbrados a los viejos modos. La hipótesis kuhniana tuvo un gran éxito, aunque no lograrse ser aceptada unánimemente. Sin embargo, al sostener que el nuevo paradigma era inconmensurable con el anterior, al que sustituía, no pudo explicar la vigencia de capítulos fundamentales, pilares científicos como la geometría de Euclides, la física de Newton, la reproducción celular o el cálculo infinitesimal. «Revolución» no es la palabra adecuada para describir un proceso que se prolonga durante siglos, ni un cambio cuya naturaleza no se especifica. La multiplicación de las revoluciones científicas las despoja de su capacidad para identificar un acontecimiento singular. La conversión de la energía del carbón en trabajo mediante la construcción de la máquina de vapor es el proceso que caracteriza la Revolución Industrial, y no se aplica a la explotación de otras fuentes de energía, como la electricidad o la radiación.

La Revolución Científica es el proceso que cambió el conocimiento de la naturaleza, al añadir a la descripción de las propiedades la medida de las magnitudes, el estudio experimental de los fenómenos, la formulación matemática de las leyes naturales que permitió la ampliación del conocimiento científico a partir de las ecuaciones y el cálculo. La aparición de las ciencias experimentales puso de manifiesto la trascendencia de un acontecimiento singular, que las universidades mantuvieron al margen de sus planes de estudio hasta mediados del siglo XIX.

§1. El paso del tiempo

Los griegos llamaron *Phainomena* a los cambios que se producían en el cielo. El movimiento era un fenómeno que se observaba en el cielo bajo la esfera de las estrellas fijas y en la Tierra. Recordemos que la primera descripción del concepto es la que Aristóteles denominó «movimiento local», que consistía en el cambio de posición de un cuerpo en el espacio. El movimiento tiene dos magnitudes: la distancia que separa la posición inicial de la final y el tiempo que dura el fenómeno. Calcular la distancia entre los cuerpos celestes era un problema geométrico; en la Tierra se disponía de unidades que, aplicadas sobre las cosas, proporcionaban sus medidas. Las primeras unidades de tiempo fueron las astronómicas, la duración de los fenómenos celestiales. La observación de los movimientos celestes y la introducción de un conjunto de puntos y líneas imaginarios hicieron posible identificar las posiciones de los cuerpos en movimiento y medir sus magnitudes. La reaparición de un cuerpo celeste en un punto determinado del espacio permitió definir las unidades astronómicas: el tiempo entre dos apariciones sucesivas del Sol sobre el horizonte era un día, entre dos apariciones de la Luna nueva era un mes y entre dos pasos sucesivos del Sol por el equinoccio de primavera era un año. Al contar las veces que se producía el fenómeno se podían medir los múltiplos de estas unidades; por ejemplo el siglo, y no era necesario medir tiempos menores al día. La observación del movimiento de la sombra indujo a los egipcios a clavar un palo en el suelo, y el sistema duodecimal de numeración que usaban les hizo dibujar un arco que dividieron en 12 partes iguales a las que los griegos y romanos llamaron hora. El reloj de Sol mide el paso del tiempo, cualquier cantidad a partir de cualquier momento. Tenía en cambio limitaciones importantes: no funcionaba cuando no brillaba el astro en el cielo y no podía medir con precisión el tiempo menor que una hora. El minuto, $1/60$ de hora, apareció en el siglo XIV, y el segundo, $1/60$ de minuto, es una creación asociada a la invención del péndulo. Había otra posibilidad: medir una cantidad determinada de tiempo con gran precisión. El reloj de arena contiene partículas de

este material que pasan de una a otra de sus partes a través de un estrechamiento que aumenta la duración del tránsito. Lo único significativo es el tiempo que tarda en pasar toda la arena de una a otra, siempre el mismo. Su primer uso fue para marcar el tiempo concedido a los oradores en el Areópago, el tribunal supremo de la antigua Atenas, encargado de juzgar asuntos criminales. El reloj de agua (clepsidra), inspirado en Arquímedes, servía para medir el volumen del agua trasvasada de un recipiente a otro, mediante líneas marcadas en el primero que aparecían según iba pasando el líquido. No permitía medir unidades menores y carecía de precisión. Galileo lo usó como Arquímedes al pesar el agua trasvasada.



Reloj de sol en Tarragona

La medida del movimiento es la relación entre el espacio y el tiempo. Una forma antigua de medir la velocidad fue en el ámbito naval. Se utilizaban un reloj de arena y una cuerda, en la que se disponían nudos situados a distancias regulares (habitualmente una braza, esto es, 1, 8 m). En uno de los extremos de la cuerda se ataba una pieza de madera, y lo primero que se hacía (en el barco en movimiento) era lanzar al agua la madera, y por lo tanto la cuerda, cuya primera parte no tenía nudos para permitir que aquella flotase sin moverse. Cuando llegaba el primer

nudo, comenzaba a medirse el tiempo, y en el momento en que se agotaba la arena del reloj, se sujetaba la cuerda para que no pudiese continuar avanzando. El número de nudos que habían pasado daba una medida de la velocidad en un tiempo determinado, no el paso del tiempo.

El cambio de posición era la esencia del movimiento, del que Aristóteles distinguía dos tipos, cada uno propio de un lugar, el mundo celeste y el sublunar, a los que dedicó sendos libros, el *Del cielo* y la *Física*, en los que describía la composición y el cambio en los cielos y en la Tierra. Distinguió entre el movimiento uniforme y circular de los planetas y las estrellas, y el natural de los cuerpos que se dirigían a ocupar su posición natural en la Tierra. En ésta, «por naturaleza cada uno de los cuerpos permanece o es llevado a su lugar propio y esto se cumple hacia arriba o hacia abajo». Los movimientos contrarios al natural se explicaban por la acción de una fuerza exterior, el *Ímpetus* del brazo que lanzaba un proyectil —una piedra o una jabalina—, la fuerza del viento, etc., tal como hemos comentado anteriormente. Como explicación para la supuesta diferencia de tiempo en la caída de los graves, Aristóteles señaló la diferencia de peso. Tuvo una intuición feliz: «El tiempo es la medida del movimiento», pero, sin posibilidad de medirlo, se limitó a ofrecer unas cuantas proporciones enlazadas, entre las que no figuraba la velocidad:

Supongamos que A es el moviente, B la cosa movida, C la distancia recorrida y T el tiempo en el cual es movida. Entonces 1) en el tiempo T una fuerza igual a A hará que algo que es la mitad de B se mueva sobre el doble de la distancia C, y 2) lo hará mover sobre la distancia C en la mitad de tiempo T, pues de esta manera se mantendrá la proporción, y 3) [...] también hará mover a B sobre la mitad de C en la mitad del tiempo T, y 4) una fuerza igual a la mitad de A moverá a la mitad de B sobre la distancia C en el tiempo T.

Pero la intuición engañó a Aristóteles al sugerirle que un peso doble recorrería una distancia doble en el mismo tiempo o la misma distancia en la mitad del tiempo. La limitación fundamental de su conocimiento era la incapacidad de medir más tiempo

que el astronómico.

En Roma la *velocitas* era una propiedad del sujeto, no una magnitud: la rapidez del corredor que llegaba antes que los demás, la de las llamas que avanzaban deprisa (*veloces flammae*). Existía un nombre para el cambio de velocidad durante el movimiento —«las legiones aceleran la marcha»—, pero no podían medir ni una ni otra. En las lenguas romances se documenta hacia 1270 la reaparición de la velocidad con el mismo significado que en latín clásico. En el siglo XIV los «calculadores» del colegio de Merton (Oxford) ofrecieron sus especulaciones sobre la naturaleza del movimiento e imaginaron la velocidad como una proporción. Un teorema es una verdad demostrable, no una unidad de medida. En 1335, William Heytesbury formuló el teorema de la velocidad media: «Un cuerpo en movimiento con velocidad constante recorre una distancia en un tiempo dado, igual a la de un cuerpo acelerado cuya velocidad final sea el doble de la velocidad media», y en 1361 Nicolás Oresme, un maestro de la Universidad de París, ofreció una demostración geométrica que le dispensaba de medir el tiempo para demostrar el resultado. Construyó, como acostumbraba, un sistema con dos ordenadas que marcaban el comienzo y el final del movimiento, representó el movimiento uniforme por una línea paralela al eje de las abscisas y el uniformemente acelerado por una diagonal que iba del origen del sistema a la segunda ordenada y cortaba a la anterior por el punto medio. La razón entre espacio y tiempo era la unidad, al ser iguales las áreas del rectángulo y el triángulo, y la velocidad media era la mitad de la final. La medida de las magnitudes de la figura no tenía valor, al no ser ésta una reproducción a escala.

Ya en sus primeras investigaciones, Galileo utilizó el péndulo, una máquina elemental que se añadió a las conocidas desde la Antigüedad. Se dice que a los 19 años, cuando estudiaba medicina en la Universidad de Pisa, observó la oscilación de la lámpara de la catedral, descubrió la regularidad de su movimiento, midió el tiempo de un periodo (ida y vuelta) con los pulsos de la sangre en las venas y construyó los primeros péndulos, si bien los primeros resultados conocidos son posteriores. La falta de interés por la medicina fue la causa del abandono de sus

estudios, de modo que a los 21 años estaba de vuelta en Florencia sin ningún título académico, dedicado a la enseñanza y al estudio de Aristóteles; fue en esta época cuando escribió, en la línea de Arquímedes, sobre la balanza hidrostática y el método para identificar el centro de gravedad de los sólidos (*Theoremata circa centrum gravitatis solidorum*). En 1589 fue contratado por tres años por la Universidad de Pisa. Durante su estancia en la ciudad escribió un tratado sobre el movimiento (*De motu*) que quedó inédito. De acuerdo con la doctrina aristotélica, comenzó por la causa del movimiento natural, aunque, en vez de atribuirlo al peso, propuso la acción de una fuerza exterior. Sustituyó las dos propiedades que Aristóteles adjudicara a los cuerpos, la ligereza y la pesantez, por una única fuerza, la *gravitas*; postuló la existencia del vacío y la caída simultánea de los cuerpos, antes de que en el siglo XVII Otto von Guericke lograra un vacío y Robert Boyle verificara experimentalmente su hipótesis. De 1592 a 1610 Galileo enseñó Mecánica en la Universidad de Padua, y de esta experiencia se conservan 17 capítulos, en 12 de los cuales, que se publicaron en París en 1634 (*Les mechaniques*), describió las funciones de las máquinas elementales: «La ciencia de la Mecánica», escribió allí, «es el conocimiento que explica las razones y descubre las causas de los efectos maravillosos que se producen con el empleo de varios instrumentos, como son mover y levantar grandes pesos con muy poca fuerza».

En 1602 retornó al estudio del movimiento como un fenómeno natural —«El movimiento es movimiento y actúa como movimiento en tanto en cuanto se relaciona con las cosas que carecen de él»—, explicando el fenómeno por la acción de fuerzas que no pudo definir pero sí medir.

Los experimentos de Galileo le llevaron a formular las leyes del péndulo (*isocronismo*): descubrió que, en un plano vertical fijo, el movimiento era independiente del peso de la bola y de la amplitud del movimiento, mientras que era inversamente proporcional a la longitud del hilo. Al duplicar ésta, el batir del péndulo se reducía a la mitad. El último año de su vida explicó a su hijo la forma de construir un reloj de péndulo, pero las instrucciones no eran lo suficientemente precisas o la habilidad de éste no la necesaria. En 1644, Marin Mersenne calculó la

longitud del hilo para que el periodo fuese de un segundo, y en 1657 Christian Huygens utilizó el movimiento cicloidal para construir, esta vez sí, el primer reloj de péndulo, que adquirió su forma definitiva al acoplar el movimiento pendular al giratorio de una rueda dentada controlada por un escape o áncora que movía las agujas de un reloj sobre un plano dividido en 12 horas. Después de introducir mejoras sustanciales en el diseño inicial, en 1673 publicó *Horologium oscillatorum sive de motu pendulorum*, en el que determinaba la oscilación del péndulo simple y compuesto, el centro de oscilación y las leyes de la fuerza centrífuga en el movimiento circular. El reloj de péndulo fue el instrumento más preciso para medir el tiempo hasta el siglo XX.

§2. Velocidad y movimientos

Como en otras ocasiones, Aristóteles construyó su teoría del movimiento a partir de una distinción conceptual, la que se observa entre el reposo y el movimiento. El primer motor permanecía inmóvil más allá de la última frontera, el cielo de las estrellas fijas, y la Tierra estaba en reposo, mientras que los cielos planetarios tenían un movimiento perfecto: uniforme y circular. En la Tierra había dos movimientos: el natural (vertical, tanto el ascendente del aire y del fuego como el descendente de la tierra y el agua, cuya magnitud era imposible medir) estaba determinado por la tendencia de los elementos a ocupar un lugar de acuerdo con su naturaleza, en tanto que el violento desplazaba a los cuerpos en la dirección marcada por el impulso. En su lugar natural el cuerpo permanecía en reposo hasta que una acción exterior lo desplazaba. Todo desplazamiento deja una huella, la distancia entre dos posiciones, un arco o una línea recta, y un tiempo que nadie había podido medir.

La «cantidad de movimiento» de Galileo, conocida más tarde como «velocidad», es la magnitud que determina la naturaleza del movimiento. Es la razón entre el espacio y el tiempo, y se expresa mediante unidades compuestas: m/s y km/h. La causa del movimiento era una fuerza exterior que, como queda dicho, no se podía describir, pero sí medir. La velocidad determinaba el tipo de movimiento. La

velocidad constante permitió explicar el movimiento rectilíneo uniforme, que Galileo definió conceptualmente: «Por movimiento igual o uniforme entiendo aquel en el que los espacios recorridos por un cuerpo en tiempos iguales son iguales entre sí». La razón espacio/tiempo era una constante, la velocidad media, en tanto el valor de la velocidad en un instante es el resultado del cálculo y se expresa mediante una función. A pesar de todo, Galileo seguía enredado en el discurso aristotélico.

El experimento, la aportación fundamental de Galileo al conocimiento científico, es la reproducción de un fenómeno natural en las mejores condiciones para observar y medir su naturaleza. No existe acuerdo en cuanto a su contenido. Se aplica tanto para la medida de una magnitud, por ejemplo la longitud de la Tierra o la velocidad de la luz, como en la reproducción de un fenómeno: movimiento, reacción química, etc. Para medir el movimiento no había otro recurso que reducir su velocidad. La solución que encontró Galileo fue utilizar planos de madera pulida que podía colocar sobre una mesa o el suelo con distintas pendientes para reducir la velocidad. La alternativa era la «caída libre» que se daba en el aire, e imaginó lo que sería en el vacío: la misma para todos los cuerpos, como demostraría Boyle experimentalmente. Los experimentos con planos inclinados le llevaron a medir el cambio de velocidad durante el movimiento, la aceleración, un fenómeno constante y universal, y definió el movimiento uniformemente acelerado como «aquel que a partir del reposo adquiere aumentos de velocidad iguales en tiempos iguales».

Esta vez la medida de las magnitudes determinó las propiedades del fenómeno, a diferencia de lo descrito en el movimiento uniforme. Para descubrir la razón entre espacio y tiempo necesitaba establecer la posición de la bola al cabo de cada unidad de tiempo. Un plano inclinado proporcionó a una bola de bronce el espacio para rodar y la *gravitas* la fuerza que producía una aceleración constante. En vez de un tiempo continuo, Galileo utilizó los intervalos que podía medir con un péndulo y determinó mediante ensayos repetidos las distancias recorridas en cada unidad de tiempo. Colocó en la parte superior un pequeño péndulo que entraba en funcionamiento al liberar la bola y cruzó transversalmente una cuerda que

accionaba una campanilla. Cuando ambos sucesos coincidían fijaba la posición y repetía el experimento con la cuerda más abajo, y así sucesivamente hasta reunir una serie suficiente de distancias y tiempos. Al comparar los datos de cada experimento, descubrió que las distancias recorridas por unidad de tiempo eran proporcionales a la serie de los números impares, y que las distancias al final de cada periodo eran iguales al cuadrado de los tiempos. Y nos ofreció una descripción de sus experimentos para reforzar sus conclusiones:

Repetimos el mismo experimento muchas veces [...] y pudimos constatar que no se hallaba nunca una diferencia ni siquiera de la décima parte de una pulsación [...] hicimos que esa misma bola descendiese solamente por una cuarta parte de la longitud [...] Medido el tiempo de la caída resultó ser siempre [...] la mitad del otro. Haciendo después el experimento con otras partes [...] llegamos a la conclusión [...] de que los espacios se relacionaban entre sí como los cuadrados de los tiempos. Esto se podía aplicar a todas las inclinaciones del plano.

El uso de las medidas para describir los fenómenos ofrecía la posibilidad de expresar los resultados en forma de ecuaciones, y la manipulación de éstas permitió alcanzar nuevos resultados sin necesidad de reproducir el experimento, simplemente mediante operaciones matemáticas.

§3. La física del movimiento

La física es el conocimiento de la materia, de las radiaciones y del movimiento de los cuerpos. Al desplazar a la Tierra del centro del Universo, Copérnico le atribuyó los movimientos propios de los planetas: la rotación en torno a su eje con velocidad distinta en cada caso, y la traslación alrededor del Sol en una órbita que se creyó circular hasta que Kepler descubrió que era elíptica, con el Sol en uno de los focos. La rotación movía a la esfera terrestre en dirección contraria a las agujas del reloj y un giro completo requería 24 horas, sin que hubiera desplazamiento. Cuanta más cercanía al Sol, mayor era la resistencia: mientras que Mercurio realizaba un único

giro, la Tierra lo hacia 58 veces.

Si Copérnico y Kepler se habían dedicado al estudio de los movimientos celestes, Galileo se especializó en los de la Tierra y formuló las primeras leyes naturales en este medio. Para Aristóteles la situación natural de los cuerpos era el reposo, que alcanzaban en virtud de la tendencia que todos ellos tienen a ocupar su lugar natural. El paso del reposo al movimiento se explicaba por una acción violenta. La presencia de una fuerza (peso) superior a la resistencia del medio era la condición del movimiento. En *Epitome Astronomiae Copernicanae* (1618, 1621), Kepler describió la inercia como la resistencia que ofrecía un cuerpo para pasar del reposo al movimiento: «para que abandone su posición y su reposo tiene necesidad de algún poder que sea más fuerte que su materia... y que pueda vencer a su inercia natural».

Los aristotélicos combatían la física galileana por su incapacidad a la hora de verificar el movimiento de la Tierra. Si la Tierra se movía, ¿cómo se explicaba que una piedra abandonada desde la cofa del palo de un barco cayese al pie del palo en vez de hacerlo en un punto situado al oeste?: debido al movimiento de la Tierra. Galileo concibió el movimiento como un fenómeno y no una propiedad de los cuerpos: «El movimiento es movimiento y opera como tal movimiento en tanto en cuanto tiene relación a cosas que carecen de él; pero entre las cosas que participan igualmente de él nada opera y es como si no existiese». Este párrafo, aunque no se caracteriza por la claridad de su exposición, incluye dos proposiciones fundamentales: el movimiento mueve a las cosas —para evitar la tautología, diríamos «el movimiento es la causa del cambio de posición de las cosas»—, y la segunda parte se refiere a la no percepción del movimiento del que se participa.

Un experimento virtual permitió a Galileo explicar la relatividad del movimiento, la imposibilidad de un observador desde el interior del cuerpo de decidir si éste se encuentra en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme:

Enciérrese con algún amigo en la mayor cabina bajo la cubierta de un barco grande con mosquitos, moscas y otras pequeñas criaturas aladas. Llene una artesa con agua y ponga en ella algunos peces, cuelgue una botella que

gotee sobre otra botella de cuello estrecho. Si el barco permanece en reposo observará como los pequeños animales alados vuelan con parecida velocidad en todas direcciones, como los peces nadan hacia todos los lados y como todas las gotas caen en la botella situada debajo [...] Haced ahora que el barco se mueva con la velocidad que deseéis, siempre que el movimiento sea uniforme y no haya oscilaciones en uno u otro sentido. Usted no será capaz de distinguir la menor alteración en todos los efectos citados ni podrá colegir por ninguno de ellos si el barco se mueve o está quieto. La causa de la correspondencia de los efectos es que el movimiento del barco es común a todas las cosas que hay en él e incluso al aire [...] Lo que se experimenta y mide es el cambio de velocidad.

Los experimentos con el péndulo y el plano fueron decisivos para la construcción de la teoría del movimiento en la Tierra. El primero había mostrado que la bola del péndulo alcanzaba la misma altura en cada oscilación y que lo mismo ocurría cuando rodaba sobre dos planos que formaban un ángulo, aunque las longitudes fuesen distintas. Si el segundo plano era horizontal, el movimiento acelerado se volvía uniforme y constante, siempre en el caso de suprimir la fricción. En *Diálogos sobre los dos sistemas máximos del mundo* (1632), Salviati (Galileo) lleva a Simplicio a aceptar sucesivamente: 1) que en un plano inclinado una bola rodaría según la pendiente; 2) que continuaría moviéndose infinitamente si el plano no tenía fin, con movimiento continuamente acelerado, y cuanto mayor fuese la inclinación mayor será la velocidad; 3) que si no hay inclinación en el plano, debería parecer naturalmente quieta; y 4) que si le fuese comunicado algún movimiento y el espacio no tuviese fin, el movimiento sería eterno.

De esta manera, Galileo llegó a la conclusión de que «un cuerpo que se mueve por un plano horizontal continuará moviéndose en la misma dirección con velocidad constante salvo que sea perturbado», una forma de ley de la inercia (que ya había adelantado René Descartes, como se puede comprobar en uno de sus libros, *Les Principes de la Philosophie*, de 1644), aunque con la dificultad de que, incapaz de

abstraer la presencia de la gravedad, en el fondo no queda claro si Galileo tendría que concluir que, de ser la superficie de la Tierra lisa, sin rozamiento, tal cuerpo se movería siguiendo la circunferencia terrestre.

La percepción del movimiento requería la presencia de un observador y la determinación del punto de vista desde el que se observa la naturaleza del movimiento y se miden las distancias y tiempos. El marco de referencia determina la posición del cuerpo mediante un sistema de coordenadas. La caída de una piedra desde el mástil de un barco concluye al pie de éste para el marinero en cubierta, pero describe un brazo de parábola para quien lo contempla desde otro marco de referencia. Un marco de referencia es inercial cuando se encuentra en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme.



Portada del Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, de Galileo Galilei (1632)

Además del cambio de velocidad durante el movimiento, Galileo descubrió la posibilidad de someter un cuerpo a la acción simultánea de dos movimientos, y calculó la trayectoria y velocidad consiguientes de una bala de cañón sometida al impulso de la deflagración de la pólvora y a la fuerza de la gravedad. La trayectoria resultante era una semiparábola y el mayor alcance se obtenía cuando la altura era de 45°. Construyó un instrumento portátil para medir las oscilaciones de un pequeño péndulo (*pulsilogium*) con el que midió la velocidad del sonido (350 m/s). El movimiento de la luz se consideraba instantáneo y, por tanto, no podía medirse. Aun así, Galileo diseñó un experimento para comprobar si la velocidad era finita o no. Recurrió a dos personas, cada una con un farol, que descubrían al ver la luz del otro, aunque, al limitar la distancia entre ambos a menos de una milla, no pudo extraer ninguna conclusión.

Resumiendo, el método de Galileo se basa en la observación experimental del movimiento, inventó el reloj de péndulo para medir el paso del tiempo durante la caída de los cuerpos e identificó la naturaleza de los movimientos, distintos de los propuestos por Aristóteles. Definió la velocidad, la magnitud esencial del movimiento, como la relación entre dos magnitudes variables, el espacio y el tiempo, e introdujo la primera unidad compuesta de la historia, la velocidad, aunque no escribió la ecuación $v = e/t$. La naturaleza de las cosas y sus propiedades pasaron a segundo plano. Enunció con palabras la relación entre las magnitudes. La composición de la materia, la diversidad de los fenómenos —el calor, la atracción/repulsión de los polos magnéticos, la gravedad, la afinidad— y la causa de éstos fueron las preguntas a las que se enfrentaron los científicos en una explosión del conocimiento de la naturaleza. El descubrimiento de las leyes de la naturaleza es desde entonces el objetivo común de la mayoría de las investigaciones científicas y la expresión habitual de sus resultados. El conocimiento de las leyes permitió la predicción de los fenómenos, uno de los caracteres fundamentales para la definición de la ciencia.

§4. El método científico y las ciencias experimentales

En la primera mitad del siglo XVII Francis Bacon (1561-1626) y Galileo, contemporáneos próximos pero no relacionados, coincidieron en medir el movimiento con los pulsos, aunque Bacon no fue más allá, y en destacar la importancia del experimento, aunque al primero no se le conoce ninguno fuera de las medidas citadas. La «filosofía natural» era la denominación que utilizaban los críticos de la especulación. La primera manifestación de su pensamiento se encuentra en *The Advancement of Learning* (1605), que contiene un párrafo especialmente significativo: «Los hombres trataron de construir un mundo [...] y extrajeron de su mente el material que emplearon, en vez de acudir a la experiencia y a la observación.



Portada de Novum Organum, de Francis Bacon (1620)

De hacerlo, habrían dispuesto de hechos en vez de opiniones sobre las que especularon y habrían llegado al conocimiento de las leyes que rigen la materia».

Entre 1606 y 1612, Bacon escribió varios trabajos que quedaron inéditos en los que condenaba la lógica aristotélica como la causa de la confusión filosófica. En el *Novum Organum* (1620) describió los errores que adulteran el conocimiento y sus causas, a las que denominó «ídolos» para expresar su falsedad: los de la tribu son la consecuencia de las limitaciones de la observación, que comparaba con un espejo roto que distorsiona las imágenes; los de la cueva proceden de la cultura y reflejan los valores (creencias y prejuicios) de los colectivos (pueblo, familia, iglesia); los del mercado se deben a las limitaciones del lenguaje y la comunicación, y los del teatro están producidos por la influencia de los sistemas de pensamiento dominantes, como la filosofía de los sofistas, en la que incluye a los escolásticos, el empirismo y la confusión de la filosofía y la teología. En la segunda parte del *Novum Organum Scientiarum* (1620) Bacon presentó un conjunto de aforismos, que le sirvieron para describir el método científico que proponía. La inducción se basa en la verificación mediante la observación y la experiencia (la imagen que ofrece la memoria), la validez de un axioma. El proceso se repite hasta llegar a la proposición más general (última). Bacon trató de legitimar su método alegando que tenía las mismas posibilidades de error en su aplicación y era superior en virtud del consenso sobre los principios generales. Explicó con un ejemplo el proceso que conduce a aislar lo que se quiere conocer, por ejemplo, el calor, construyendo una tabla de presencia con las cosas en las que esta propiedad se manifiesta y otra de aquellas en que no lo hace (tabla de ausencia). Ambas son selectivas, para evitar que sean inmanejables, y con las dos se crea una tercera (tabla de grados).

La esencia del método baconiano está contenida en los dos siguientes puntos del *Novum Organum*:

19. No hay ni pueden haber más que dos vías para la investigación y descubrimiento de la verdad: una que, partiendo de la experiencia (distinta del experimento) y de los hechos, se remonta enseguida a los principios más generales y en virtud de esos principios que adquieren una autoridad

incontestable, juzga y establece las leyes secundarias (cuya vía es la que ahora se sigue), y otra que de la experiencia y de los hechos deduce las leyes, elevándose progresivamente y sin sacudidas hasta los principios más generales que alcanza en último término. Esta es la verdadera vía, pero jamás se ha puesto en práctica

22. Uno y otro método parten de la experiencia y de los hechos y se apoyan en los primeros principios; pero existe entre ellos una diferencia inmensa, puesto que el uno de ellos solo desflora de prisa y corriendo la experiencia y los hechos, mientras que el otro se eleva gradualmente a las leyes que en realidad son más familiares a la naturaleza.

Al contrario que Bacon, Galileo no escribió un libro para explicar el método científico que utilizaba: se limitó a describir los experimentos que hacía para descubrir la regularidad de los movimientos. El objeto de su investigación, fuera de la observación telescópica, fue el fenómeno del movimiento, que se basa en la medida de dos magnitudes —espacio y tiempo—, y el descubrimiento de las relaciones cuantitativas entre ellas, de forma que pudiesen expresarse en forma de razones cuantitativas. La precisión de las medidas era tan necesaria para él como lo había sido para Tycho Brahe. El uso del péndulo y la coincidencia de los resultados obtenidos en la repetición de los mismos experimentos le proporcionaron la certeza de la corrección de sus resultados.

El ejemplo de Galileo determinó la multiplicación de los experimentos, orientándolos hacia el estudio de los fenómenos: el calor, el magnetismo, la electricidad y la vida. Ahora bien, ninguno de los que añadieron capítulos al libro de la ciencia encontró respuesta a preguntas fundamentales, como ¿qué es la fuerza? o ¿qué es la energía?, lo que no impidió el desarrollo de la ciencia experimental. La ciencia experimental fue el origen de la física, el conocimiento de la materia dio lugar a la química y la historia natural se convirtió en un capítulo de la biología. El método experimental, en definitiva, permitió construir nuevas ciencias, que no obstante fueron ignoradas por las universidades, que no las

incorporaron a sus planes de estudio hasta mediados del siglo XIX. En su lugar se crearon academias, como la del Cimento (experimento), algunas con patrocinio real, como la *Royal Society* de Londres y la *Académie des Sciences* de París. La posibilidad de instaurar cátedras especiales financiadas por un particular permitió a algunos hacerse un sitio en la Universidad. La comunicación epistolar creó vínculos colectivos entre los científicos: el «colegio invisible» del que hablaba Boyle.

Capítulo 5

Partículas, fuerzas y energía. Newton a la conquista del continente

Contenido:

§1. *Interacción*

§2. *Interacciones por contacto: los vórtices de Descartes*

§3. *La dinámica y gravitación newtonianas*

§4. *Energía*

§5. *El paradigma newtoniano*

§1. Interacción

El principio de inercia, el que tratamos en el capítulo precedente, se refiere, básicamente, a un cuerpo, pero en el Universo existen muchos cuerpos, no uno solo. De hecho, no tendría sentido hablar de «cambios en el tiempo» si no existiese más de un cuerpo en el Universo, porque ¿cómo podríamos identificar entonces que ese cuerpo cambia de posición?, ¿con respecto a qué? En consecuencia, nos vemos abocados a una ciencia del movimiento que debe referirse a conjuntos de cuerpos. Esos conjuntos de cuerpos pueden o no influirse unos a otros. Si no lo hacen decimos que se trata de cuerpos libres, pero si se afectan entre sí hablamos de interacciones. Surge entonces la cuestión de cómo se afectan, cómo interaccionan los cuerpos entre sí. Tres han sido los conceptos creados para explicar la interacción entre cuerpos; de hecho, más que creados, podríamos igualmente decir los tres conceptos imaginables, en tanto que resulta difícil pensar en otras posibilidades. El primero es el de interacción por contacto; esto es, mediante el choque de dos cuerpos, que de esta forma se ven, lógicamente, afectados en sus historias posteriores. El segundo es el de interacción a través de un medio, sea éste del tipo que sea, los vórtices cartesianos o el éter-campo electromagnético. Finalmente, está la interacción a distancia, la forma más enigmática porque no es necesario ningún medio en el que se apoye o a través del cual se propague la interacción. Bien podríamos hablar en este caso de correlaciones, en lugar de

interacciones, pero independientemente de cuál sea el término empleado, queda lo misterioso de él, como reconoció Isaac Newton, el responsable de su introducción en la física.

§2. Interacciones por contacto: los vórtices de Descartes

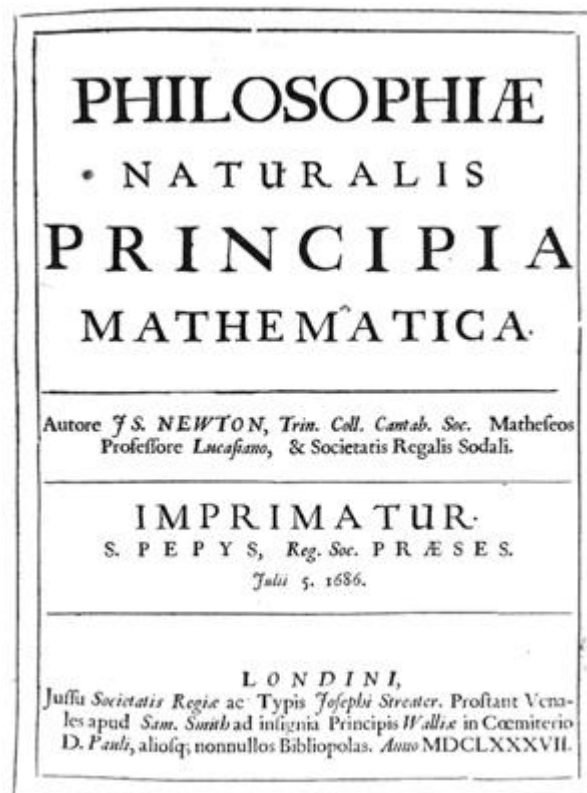
No sorprende que fuera un tipo de interacción a través de un medio el mecanismo con el que primero se intentó una gran representación física del mundo. Su autor fue Descartes. El modelo que produjo se basaba en la idea de que «la materia se divide en partes indefinidas e innumerables» y en la existencia de un *plenum* formado por una materia sutil, organizada en remolinos o vórtices. Como explicó en *Les Principes de la Philosophie*, la gravitación (entendiendo por ésta el «motor» responsable de que los planetas se muevan en torno a una estrella) no es sino la consecuencia de que los cuerpos celestes son arrastrados por un remolino, en cuyo centro se encuentran el Sol o la Tierra en el caso de, por ejemplo, la Luna, mientras que la gravedad (el «poder» que hace que los cuerpos caigan hacia el centro de un planeta o estrella) es producida por el peso de la materia del vórtice por encima del cuerpo en cuestión.

El modelo de Universo vorticial de Descartes ejerció una gran influencia. Abundan los ejemplos en este sentido, pero ninguno alcanzó mayor notoriedad que la cuestión de la figura de la Tierra, ya que los cartesianos defendían que se trataba de un esferoide oblongo alargado en los polos y achatado en el ecuador, mientras que según la física de Newton el achatamiento afectaba a los polos, siendo el diámetro del ecuador mayor. Para resolver dicha cuestión la Académie des Sciences de París organizó dos expediciones, una a Laponia y otra a Quito. Se trataba de medir la longitud de un grado de meridiano en latitudes altas y compararla con las mediciones hechas en el ecuador. La expedición a Laponia (1736-1737) estuvo encabezada por Pierre Louis Maupertuis, y en ella también participó Alexis Claude Clairaut, mientras que la que viajó a América (que realizó sus trabajos desde 1736 hasta 1743) estuvo dirigida en lo que a observaciones y mediciones geodésicas se refiere por Charles-Marie de La Condamine, con la ayuda de, entre otros, los

españoles Jorge Juan y Antonio de Ulloa, designados por el Consejo de Indias. Finalmente, se comprobó que la Tierra está achatada por los polos, como exige la física newtoniana.

§3. La dinámica y gravitación newtonianas

Fue Isaac Newton (1642-1727) quien logró desarrollar la dinámica que reinaría sin alternativas durante más de dos siglos, hasta que Albert Einstein demostró sus límites con la teoría especial de la relatividad (1905). El lugar en el que Newton presentó su dinámica constituye uno de los grandes libros de la historia de la ciencia: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*; 1687).



Portada de Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, de Isaac Newton (1687)

Se trata de una obra compleja, estructurada en tres partes (libros). El primero

(«Sobre el movimiento de los cuerpos») contiene las leyes básicas del movimiento, de una de las cuales, la de la inercia, ya disponía Newton, pues, como acabamos de ver, había sido formulada por Descartes. Ahora bien, esta ley, y cualquier otra que trate del movimiento, ha de ser formulada en términos de dos variables, el espacio y el tiempo; esto es, antes de una dinámica (que incluye las fuerzas que producen el movimiento) se necesita una cinemática, apartado que ya tenía una larga historia.

La cinemática que construyó Newton se basaba en los conceptos de tiempo y espacio, pero considerados como magnitudes absolutas, cuyo valor era independiente de cualquier consideración relativa al observador. La idea que Newton tenía de espacio y tiempo como magnitudes absolutas era coherente con sus opiniones religiosas, algo que sí se observa en un «Escolio» que añadió a la segunda edición de los *Principia*, y que cerraba el libro. No obstante, hay que advertir que Newton también dio argumentos físicos para sustanciar la existencia de un marco cinemático absoluto. Allí se basó en lo que le sucedería a un cubo lleno de agua suspendido del techo mediante un cuerda, al que se le hace girar, giro que origina una superficie cóncava en el líquido.

Aunque no tan básicos, igualmente necesarios para la construcción de la mecánica que buscaba eran otros conceptos, como la fuerza (a distancia), que definía en los *Principia* de la siguiente manera: «La fuerza ínsita de la materia es una capacidad de resistir por la que cualquier cuerpo, por cuanto de él depende, persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo». Y añadía: «Ésta es siempre proporcional al cuerpo y no se diferencia en nada de la inercia de la masa, a no ser por el modo de concebirla». En otras palabras, la fuerza era el impulso necesario para producir la aceleración (variación de la velocidad) o la resistencia que opone un cuerpo a abandonar el estado de reposo o movimiento uniforme.

La masa que Newton mencionaba aquí es un concepto especialmente importante y también complejo. La mejor forma de entenderlo es como «un parámetro que refleja la resistencia de un cuerpo a cambiar de movimiento o de estado de reposo»; tiene, en consecuencia, que ver con el principio de inercia. Comentaremos más adelante lo sorprendente de que esta «masa inercial» coincida con la «masa

gravitacional» que aparece en la ley de la gravitación universal formulada por el propio Newton, y que en realidad es «un parámetro que refleja la manera en que un cuerpo reacciona ante la fuerza gravitacional».

Con estos y otros recursos, Newton estableció las piezas centrales de su libro, los «Axiomas o leyes del movimiento» de la dinámica que buscaba. Ya nos hemos detenido en la primera de estas leyes, la de la inercia. La segunda la enunció de la forma siguiente: «El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime». Si hay una ley fundamental para estudiar el movimiento es ésta, que se refiere a los efectos de la aplicación de una fuerza y que habitualmente se enuncia como «Fuerza igual a masa por aceleración». Una fuerza, no se debe olvidar, es una magnitud con dirección (magnitud vectorial, o vector): el cambio de movimiento ocurre según la línea recta a lo largo de la cual se imprime la fuerza (o suma vectorial de fuerzas) en cuestión. Proporciona el instrumento básico para determinar cómo se mueve un cuerpo; claro que para ello es imprescindible conocer la forma de la fuerza, algo que el sistema no proporciona, debiéndose definir de manera independiente: una vez que se conoce, el problema se reduce a integrar la ecuación para encontrar la trayectoria, esto es, la posición en función del tiempo.

En cuanto a la tercera ley, es la siguiente: «Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria. O sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas». Sin esta ley, la de la acción y reacción, no podría hablarse de gravitación universal; esto es, que el Sol atrae a, por ejemplo, la Tierra, pero que, recíprocamente, ésta también atrae al Sol.

Una característica del sistema que Newton estableció con sus tres leyes es el de su estricta causalidad y determinismo. La segunda ley del movimiento se expresaba — se expresaría cuando su formulación matemática quedara establecida en su forma definitiva y más moderna, algo que hizo Euler— mediante una ecuación diferencial de segundo orden. Y como las leyes de fuerza dependen en principio únicamente de posiciones y velocidades, las soluciones que se obtienen de la ecuación de

movimiento que se trate sólo necesitan de posiciones y velocidades iniciales para quedar completamente determinadas. En otras palabras, dadas esas condiciones iniciales, la evolución futura del sistema queda totalmente establecida. La evolución *futura* y la *pasada*, ya que las ecuaciones newtonianas mantienen su forma cuando se sustituye el tiempo, t , por $-t$ (invariancia bajo inversión temporal). Pierre-Simon Laplace (1749-1827), uno de los grandes newtonianos, expresó con enorme gracia y claridad esta característica de la física newtoniana en uno de sus libros, *Essai philosophique sur les probabilités* (1814):

Una inteligencia que en un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan a la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos. El espíritu ofrece, en la perfección que ha sabido dar a la astronomía, un débil esbozo de esta inteligencia. Sus descubrimientos en mecánica y geometría, junto con el de la gravitación universal, le han puesto en condiciones de abarcar en las mismas expresiones analíticas los estados pasados y futuros del sistema del mundo. Aplicando el mismo método a algunos otros objetos de su conocimiento, ha logrado reducir a leyes generales los fenómenos observados y prever aquellos otros que deben producirse en ciertas circunstancias. Todos los esfuerzos por buscar la verdad tienden a aproximarlos continuamente a la inteligencia que acabamos de imaginar, pero de la que siempre permanecerá infinitamente alejado [...]. La regularidad que la astronomía nos muestra en el movimiento de los cometas tiene lugar, sin ningún género de dudas, en todos los fenómenos. La curva descrita por una simple molécula de aire o de vapor está determinada de una forma tan exacta como las órbitas de los planetas. Entre ellas no hay más diferencia que la derivada de nuestra ignorancia.

Tras enunciar las leyes del movimiento, Newton las aplicó —todavía en el libro I— a diversas cuestiones, como, por ejemplo, la demostración de la ley de las áreas, la forma de hallar órbitas elípticas, parabólicas e hiperbólicas a partir de un foco dado, el ascenso y descenso rectilíneo de los cuerpos, el movimiento de un péndulo o las fuerzas atractivas de cuerpos esféricos. La segunda parte (libro II), también titulada como la primera «Sobre el movimiento de los cuerpos», estaba dedicada básicamente al estudio de las fuerzas de resistencia al movimiento de diversos tipos de fluidos. Por último, la tercera parte, el libro III, de grandilocuente título —«Sobre el sistema del mundo»—, dejaba claro en uno de sus primeros enunciados que el sistema del mundo que contenía se basaba en una gravitación universal. «No hay duda», se lee allí («Proposición VI. Teorema VI») «de que la naturaleza de la gravedad es la misma en todos los planetas que en la Tierra». Pero el pilar de ese libro es la denominada «ley de la gravitación universal», que expresada en forma analítica, toma la siguiente forma:

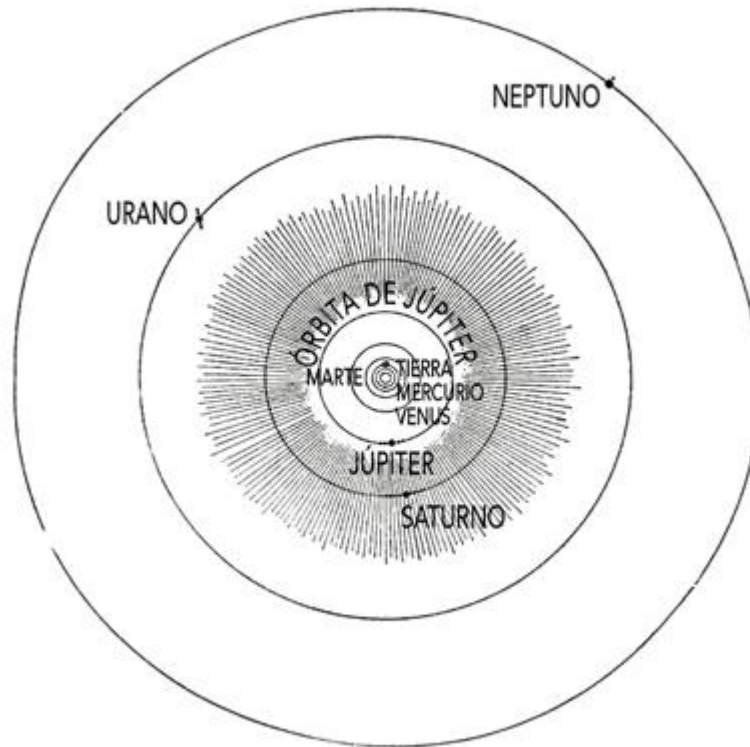
$$F = G \frac{M \times m}{r^2}$$

donde F representa la fuerza gravitacional que atrae a dos cuerpos de masas m y M separados por una distancia r , y G es una constante, la constante de gravitación universal.

Esta expresión es en realidad una definición, la de la fuerza gravitacional. Esto es, tomada por sí sola no sirve de nada; es preciso insertarla en el término de la izquierda de la segunda ley del movimiento, $F = m \times a$ (fuerza igual a masa por aceleración).

Una vez hecho, y especificadas las condiciones del fenómeno que se quiere estudiar, hay que integrar la ecuación diferencial para obtener la trayectoria en función del tiempo, $x = x(t)$. En el caso, por ejemplo, de dos cuerpos (el Sol y un

planeta), equivalente a una fuerza central, se resuelve con cierta facilidad, obteniendo las tres leyes de Kepler.



El Sistema Solar

Se resolvía así el gran problema de relacionar las órbitas elípticas que había enunciado Kepler con una fuerza gravitacional proporcional al inverso del cuadrado de la distancia. Ahora bien, la cuestión de dos cuerpos —que se puede reducir a uno en un campo de fuerza central— no constituye más que la solución a uno de los problemas más sencillos, y limitados, de los movimientos que tienen lugar en el Sistema Solar, ya que el movimiento de cualquier cuerpo de los que lo componen es resultado de las fuerzas gravitacionales que ejercen sobre él todos los restantes cuerpos (Sol, planetas, lunas). A la disciplina que se ocupa de este problema general se le denomina «mecánica celeste», y en su estudio brillaron nombres como los de Laplace o Henri Poincaré. Salvo en un caso muy sencillo (tres cuerpos situados en los vértices de un triángulo equilátero), no es posible

encontrar soluciones exactas de esos movimientos de n cuerpos (con $n > 2$), por lo que es preciso trabajar con soluciones aproximadas. Aun así, ha sido posible demostrar numerosos resultados de gran importancia, como los referentes a la estabilidad del Sistema Solar.

Al mostrar su eficacia en el gran escenario que es el Sistema Solar (y por extensión en el conjunto del Universo, dominado por la gravitación), el concepto de «fuerza» pasó a ocupar un lugar central, conceptual y operativamente, en las ciencias físicas. La fuerza se aplica desde el exterior y se caracteriza por sus efectos: la aceleración, que a su vez sólo se obtiene mediante la aplicación de una fuerza; son magnitudes directamente proporcionales: $F = m \times a$. Si sustituimos la fuerza por la gravedad, g , obtenemos la fórmula del peso (ya hicimos uso de este resultado antes): $P = m \times g$, una magnitud variable en función de la latitud y de la altura. No olvidemos, asimismo, que la fuerza es un vector, dado que se ejerce en una dirección determinada. Hay dos tipos de fuerzas: la que se manifiesta en el contacto y la que actúa en un campo, como la gravedad.

La conjunción de la segunda ley con la ley del inverso del cuadrado de la distancia permitió entender un hecho observado por Galileo (y por otros antes): que todos los cuerpos caen juntos a pesar de que sus pesos sean diferentes. La cuestión es importante porque involucra al concepto de masa.

En principio, cabría esperar que en la ley $F = m \times a$, la masa no fuese idéntica a la masa que aparece en la ley del inverso del cuadrado de la distancia, ya que, como apuntamos con anterioridad, en el primer caso se trata de una magnitud relacionada con la resistencia de un cuerpo a abandonar su movimiento inercial (masa inercial, m_i), mientras que en segundo es una magnitud que representa la reacción ante la fuerza gravitacional (masa gravitacional, m_g). Ahora bien, si suponemos que ambas son idénticas, entonces podemos escribir para el movimiento de un cuerpo de masa m que cae hacia la Tierra (de masa M) debido a la atracción gravitacional

$$m \times a = G \frac{m \times M}{r^2}$$

y, como m aparece en los dos lados de la ecuación, se puede eliminar, obteniendo

$$a = \frac{G \times M}{r^2}$$

esto es, la aceleración con la que cae el cuerpo no depende de su masa, únicamente de la masa de la Tierra, con lo que recuperamos («deducimos») la observación de Galileo.

Un detalle que conviene resaltar es que la física newtoniana del movimiento necesitaba de un instrumento matemático adecuado; de una matemática que permitiese trabajar con magnitudes que cambiaban con el paso del tiempo, como es el caso de la posición (movimiento no es otra cosa que cambio de posición con el paso del tiempo). El propio Newton elaboró esa matemática, el «cálculo de fluxiones», una versión del cálculo infinitesimal (la otra es la de Leibniz), uno de los instrumentos matemáticos más poderosos jamás creados. A pesar de la importancia que sabemos tuvo el cálculo de fluxiones en la elaboración de Newton (las derivadas, que geoméricamente representan las tangentes, se identifican con las velocidades), siguiendo el modelo clásico de los *Elementos* de Euclides, Newton escogió presentar los *Principia* con demostraciones geométricas.

§4. Energía

No obstante la extensión y detalle de los principios y demostraciones que Newton incluyó en los *Principia*, la historia de la mecánica newtoniana no terminó en 1687; si acaso, comenzó entonces. Los *Principia*, por ejemplo, no contienen resultados como los principios de conservación del movimiento o de la energía, que hoy consideramos como apartados muy importantes de la mecánica teórica. Y no

debemos sorprendernos de ello: normalmente, las teorías científicas van elaborándose y perfeccionándose a lo largo de los años. De hecho, en lo que se refiere a la conservación de la «energía», un concepto, como enseguida señalaremos, de difícil definición, Newton no tenía demasiados problemas, puesto que asignaba a Dios la facultad de conservar el mundo en el estado en el que lo había creado.

El concepto de energía, tal y como se utiliza ahora en la física, tardó en llegar, y tuvo, además, diversos padres, con lo que queremos decir que se trata de una magnitud que se manifiesta en distintos dominios: hay energía mecánica, química, electromagnética, gravitacional, etc. De hecho, en el presente capítulo nos ocuparemos sobre todo de la energía mecánica, el dominio en el que se realizaron los primeros estudios matemáticos sobre esa magnitud física.

No hace falta conocer nada de física para darse cuenta de que los conceptos de «fuerza» y «energía» deben de estar estrechamente emparentados; al fin y al cabo, es al ejercer una fuerza sobre algo cuando se produce energía (calor, por ejemplo). ¿O no serán fuerza y energía el mismo concepto? De hecho, hasta el siglo XIX se utilizó «fuerza» para designar actuaciones que asociamos a energía, como la capacidad de producir el movimiento y la potencia que adquiere un cuerpo al ser elevado a cierta altura. Un paso importante en el camino que conduciría finalmente a distinguir entre fuerza y energía fue la introducción de los conceptos de *vis viva* (fuerza viva) y *vis mortua* (fuerza muerta).

Siguiendo los pasos de Christiaan Huygens, que en 1662, como parte de sus trabajos sobre la colisión de cuerpos, había propuesto que el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad es una magnitud que, sumada para todos los cuerpos que intervienen en un colisión elástica, es igual antes que después de la colisión, Gottfried Wilhelm Leibniz introdujo la terminología de *vis viva*, para el «trabajo en movimiento», y de *vis mortua*, para el «trabajo en reposo». «La fuerza elemental», escribió en su tratado de 1695, *Specimen dynamicum*, «que llamo muerta porque todavía no existe el movimiento, sino sólo una sollicitación de movimiento [...]. La otra es la fuerza ordinaria asociada al movimiento real, y la

llamo viva. Ejemplos de fuerza muerta los proporcionan la fuerza centrífuga, la gravedad o la fuerza centrípeta». Y añadía: «Pero en el choque que produce un cuerpo cuando ha estado cayendo durante algún tiempo, o por un arco que ha estado sin tensarse durante algún tiempo, o por otros medios, la fuerza está viviendo y nace de una infinidad de continuas impresiones de la fuerza muerta».

Esta última, y un tanto oscura, frase tomaría un sentido más exacto cuando se incorporaron pequeñas, pero muy importantes, modificaciones en la definición de *vis viva*: introducir el factor 1/2 en su definición y tomar en cuenta la masa, pasando así a ser 1/2 el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad. De esta manera, estos términos fueron incorporados a la dinámica a partir de la década de 1850 como energía cinética y energía potencial. Y junto a la noción de trabajo, T (definido como la acción de una fuerza a lo largo de un cierto recorrido, x ; esto es, «fuerza por longitud»), comenzó a precisarse la noción de «energía».

Utilizando la notación actual, tenemos que

$$T = \int F dx$$

y si introducimos la segunda ley del movimiento de Newton. Se tiene

$$T = m \times \int (d^2x/dt^2) dx$$

que se puede escribir como

$$T = m \times \int \frac{1}{2} \times d/dt(dx/dt)^2 dt$$

esto es (recordando que la velocidad se define como dx/dt)

$$T = \frac{1}{2} m \times \int d(v^2)$$

Es inmediato ahora integrar, quedando (si tomamos como límites de la integración

(o lo que es lo mismo, el recorrido sobre el que actúa la fuerza), A y B

$$T = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2$$

o lo que es lo mismo: el trabajo es igual a la diferencia de las energías cinéticas en los dos puntos.

Volvamos a considerar la fuerza, tomando ahora en cuenta su relación con un tipo de campo determinando (gravitacional, eléctrico, etc.). Para estudiar situaciones de este tipo, es preciso introducir un campo de fuerzas, digamos, en general, $V(x)$, al que se denomina «potencial». Se dice que una fuerza es conservativa si $F = -dV/dx$. En este caso,

$$\int F dx = - \int (dV/dx) dx$$

y por tanto

$$\int F dx = - \int dV$$

De donde se deduce, integrando de nuevo entre los puntos A y B , que

$$T = - (V_B - V_A)$$

Y reuniendo esta expresión con la que obtuvimos antes, queda

$$- (V_B - V_A) = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2$$

que podemos reescribir en la forma

$$\frac{1}{2} m v_A^2 + V_A = \frac{1}{2} m v_B^2 + V_B$$

Por consiguiente, se tiene que la energía cinética más la función, V , que obviamente

(para que la ecuación sea coherente) debe tener las mismas dimensiones (unidades) que la energía cinética, por lo que se la denomina «energía potencial», es la misma en los dos puntos entre los que actúa la fuerza. O expresado de otra manera,

$$\text{Energía cinética} + \text{Energía potencial} = \text{constante}$$

Hoy sabemos que la anterior expresión denota la energía (constante) de un sistema mecánico aislado, pero hay que advertir que la acepción actual (la que acabamos de expresar) del término «energía» no llegaría hasta el siglo XIX; hasta entonces, la expresión «fuerza» abarcaba también la idea de energía (al fin y al cabo, la voz griega *energeia* significa «fuerza en acción»). De hecho, la formulación más general del principio de conservación de la energía se encuentra en un trabajo que el fisiólogo (y luego físico y matemático) Hermann von Helmholtz publicó en 1847, bajo el título de *Über die Erhaltung der Kraft*, esto es, *Sobre la conservación de la fuerza* (*kraft* en alemán es «fuerza»), aunque en nuestra terminología lo que aquel *kraft* significaba es «energía».

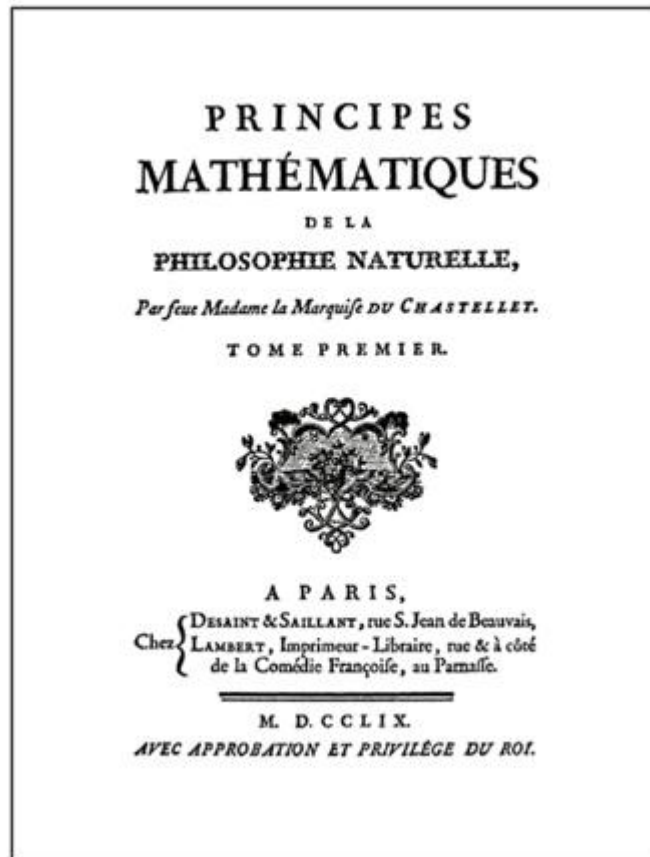
§5. El paradigma newtoniano

Newton murió en 1727, es decir, cuando el siglo XVIII había cumplido únicamente su primer cuarto, pero su influencia, su sombra, se extendió mucho más allá, cada vez con más fuerza, inundando todo el Siglo de las Luces. Es difícil, de hecho, pensar que se hubiera llegado a hablar de Siglo de las Luces, o de Ilustración, si no se hubiera dispuesto de su ciencia, especialmente la contenida en los *Principia*. Ahora bien, la física del movimiento y de la gravitación newtoniana tardó algo en salvar el canal de la Mancha y difundirse por el continente europeo, donde reinaban las ideas de Descartes, que defendía la existencia de un universo vorticial en el que el vacío de las acciones a distancia de Newton no tenía cabida. Representativo en este sentido es lo que François Marie Arouet de Voltaire, que vivió exiliado en Inglaterra por motivos políticos entre 1725 y 1728 y que fue uno de los primeros franceses en defender las ideas de Newton, dedicó a la cuestión de la introducción de las teorías y conceptos newtonianos en sus *Lettres philosophiques, ou Lettres*

anglaises (1734). Así, en la «Carta decimocuarta: Sobre Descartes y Newton», escribió:

Un francés que llega a Londres encuentra las cosas muy cambiadas tanto en filosofía como en todo lo demás. Ha dejado el mundo lleno [referencia al plenum cartesiano], aquí lo encuentra vacío [las acciones a distancia newtonianas]. En París se considera al universo compuesto de materia sutil [la que nutría los vórtices de Descartes], en Londres no hay nada de esto. Entre nosotros, es la presión de la Luna la causa del flujo del mar; entre los ingleses, es el mar quien gravita hacia la Luna, de manera que, cuando creeríais que la Luna debería daros marea alta, estos señores creen que debe dar marea baja; lo que desgraciadamente no puede verificarse, pues hubiera sido preciso, para aclararse, examinar la Luna y las mareas desde el primer momento de la creación.

Aparte de detalles como que la primera traducción de los *Principia* al francés no fue publicada hasta 1759 (la había realizado la marquesa de Chatelet [1706-1749]) y que a los científicos franceses y, en general, europeos les era difícil encontrar ejemplares de la primera edición inglesa (el problema se alivió al aparecer la segunda edición), un valioso indicador de la persistencia de las ideas cartesianas en Francia lo proporcionan los premios que periódicamente otorgaba la Académie Royale des Sciences de París a temas que ella misma había planteado. Lo que finalmente convenció a la mayoría de los científicos de que el sistema de Newton era mejor que el de Descartes fueron las sucesivas aplicaciones de la teoría newtoniana que científicos como Maupertuis y Alexis-Claude Clairaut realizaron en las décadas de 1740 y 1750 a problemas como cuál era la verdadera figura de la Tierra, el retorno del cometa Halley (previsto por Clairaut en 1758), el movimiento de la Luna o las trayectorias de las órbitas de Júpiter y Saturno.



Portada de la traducción al francés de los Principes mathématiques

Que la introducción y desarrollo de la física newtoniana —mecánica, teoría de la gravitación, y también óptica— en el continente europeo fue un proceso complicado, durante el cual en ocasiones las ideas newtonianas y cartesianas se combinaron en una dudosa mezcla, lo muestra uno de los gigantes de la ciencia de todos los tiempos, Leonhard Euler (1707-1783). Y es que Euler, un seguidor de la filosofía y los enfoques cartesianos, fue una figura capital en la configuración de la mecánica newtoniana. «El enfoque newtoniano ha guiado la evolución de la mecánica hasta su forma actual», escribió el gran especialista en Euler, Clifford Truesdell, en su Ensayos de historia de la mecánica, pero

hicieron falta los trabajos de Euler para aclarar y extender los conceptos newtonianos, para completarlos con ideas igualmente importantes, y para enseñar cómo se debían atacar [...]. La primera parte del programa de

Euler, su Mecánica [Mechanica sive motus scientia analytice] apareció en 1736, cuando tenía 29 años. Es el primer tratado de mecánica analítica propiamente dicha, en el cual todos los problemas se plantean y resuelven mediante procesos puramente matemáticos. Tanto durante este periodo como a lo largo del resto de su vida, Euler siguió los pasos de Newton al considerar a la fuerza como un concepto básico, en el mismo sentido con que se utiliza en estática. La Mecánica precisó los principios mediante tres conceptos. En primer lugar, así como Newton había utilizado la palabra «cuerpo» de manera vaga y con tres sentidos distintos por lo menos, Euler observó que los enunciados newtonianos son en general correctos sólo cuando se aplican a masas concentradas en puntos aislados; él fue quien introdujo el concepto preciso de masa puntual, y suyo es el primer tratado único y exclusivamente dedicado a este concepto. En segundo lugar, fue el primero en estudiar explícitamente la aceleración como una magnitud cinemática definida en el movimiento sobre una curva cualquiera. En tercer lugar, emplea el concepto de vector o «magnitud geométrica», una magnitud dirigida que se aplica no sólo a fuerza estática, aplicación ya bien conocida, sino también a la velocidad, la aceleración y otras muchas magnitudes.

Fue también Euler quien escribió por primera vez, en 1750, en la forma en que la conocemos, la segunda ley del movimiento newtoniano: $F = m \times d^2x/dt^2$ (no es extraño que Newton no la escribiese de esta forma, ya que es una presentación acorde con la formulación de Leibniz del cálculo diferencial, que no fue la de Newton). Asimismo, se deben a él conceptos como los «ángulos de Euler», que forman parte destacada del estudio del sólido rígido (entre 1758 y 1760 revisó toda la teoría de los cuerpos rígidos, que presentó en *Theoria motus corporum solidorum* [1765]).

El gran problema para aceptar la física newtoniana eran las fuerzas a distancia. Más de medio siglo después de la publicación de los *Principia*, al exponer d'Alembert su opinión de que lo que llamamos «fuerza» es tan sólo una manifestación del

movimiento, describía a las fuerzas newtonianas como «entes oscuros y metafísicos, únicamente capaces de extender las tinieblas sobre una ciencia de por sí clara».

El que Euler contribuyese de manera muy destacada al desarrollo de la física newtoniana, inclinándose sin embargo a favor de conceptos y modelos cartesianos, en principio incompatibles con el sistema de Newton, nos muestra que la dinámica del avance científico dista de ser lineal. Es perfectamente posible, como ilustra el ejemplo de Euler, que un científico (o grupo de científicos) desarrolle un sistema científico a través de, como diría el filósofo de la ciencia Imre Lakatos, un diálogo, o interacción, entre programas de investigación diferentes (como fueron el newtoniano y el cartesiano). En esa interacción, el, a la postre, programa triunfante se beneficia de diversas maneras del programa al que finalmente —y aun así no siempre— termina arrinconando la física.

Capítulo 6

Nuevas herramientas de cálculo. Las matemáticas más allá del número

Contenido:

§1. Trigonometría, logaritmos

§2. Geometría de coordenadas

§3. Funciones

§4. Cálculo infinitesimal e integral

§5. La noción de límite

§6. Probabilidades

La ciencia es producto de un complejo proceso presidido por la observación y la especulación. De ambos dominios nos hemos ocupado en capítulos precedentes, pero, como también vimos, bajo tales denominaciones se esconden diversos elementos. Uno de ellos, muy importante, que interviene especialmente en la elaboración de modelos y teorías (especulación), pero también en la observación (cuantificación en la toma de datos), es el matemático, sobre el que profundizaremos en el presente capítulo. Y es que los útiles y conceptos matemáticos que se crearon en los primeros tiempos de la historia de la matemática no eran suficientes para que las ciencias que se ocupan del estudio de la naturaleza progresasen. Los principios y técnicas geométricas contenidos en los *Elementos* de Euclides continuaron, y continuarían, siendo muy útiles, pero tenían sus limitaciones, al igual que las matemáticas basadas en la noción de número, un ente matemático de naturaleza discontinua. En particular, se hizo evidente la necesidad de disponer de un sistema matemático que permitiese describir el movimiento físico, un fenómeno esencialmente continuo. Fue preciso, por consiguiente, desarrollar instrumentos matemáticos que hicieran posible tratar con magnitudes continuas, lo que, a su vez, significaba enfrentarse con la cuestión del infinito. Pero antes de que se inventase semejante útil, aparecieron otros igualmente necesarios, aunque en dominios diferentes.

§1. Trigonometría, logaritmos

La trigonometría (que literalmente significa «medir ángulos»), de la que ya tratamos en el capítulo 2, es una rama de las matemáticas con la que nos familiarizamos pronto. No es extraño que así sea: sus nociones básicas se introducen fácilmente mediante figuras geométricas tan sencillas como los triángulos. Y con respecto a su utilidad, basta con recordar que con las funciones seno, coseno y tangente se puede realizar un amplio conjunto de operaciones, como calcular lados de un triángulo a partir del conocimiento de ángulos y uno de los lados o la hipotenusa.

A pesar de su dimensión geométrica, la trigonometría no formaba parte realmente del equipaje de los *Elementos* de Euclides, no al menos en lo que se refiere a nociones tan básicas para ella como pueden ser las citadas de seno, coseno o tangente. En realidad, parece que el origen de la trigonometría está ligado a la astronomía, donde lo más fácil es medir ángulos, ya que las distancias —los lados de los triángulos— son inaccesibles. Es razonable, por consiguiente, que, aunque utilizando una formulación diferente a la que ahora conocemos, encontremos cálculos de índole trigonométrica en la obra del astrónomo griego del siglo III a. C. Aristarco. Fueron, efectivamente, los griegos quienes descubrieron que los ángulos de un triángulo miden dos rectos, y dedicaron especial atención al triángulo rectángulo. Ya en el siglo II a. C. —lo mencionamos en el capítulo 2— Hiparco obtuvo las primeras tablas trigonométricas al estudiar la relación entre los lados y ángulos de los triángulos rectángulos. En concreto se ocupó de calcular el valor de la cuerda de un arco que unía dos puntos de una circunferencia por una recta trazada por su interior. Pero fue en la India donde se establecieron conceptos trigonométricos más modernos. Aparecieron en obras astronómicas como el *Surya Siddhanta* (*Sistema del Sol*, del siglo IV), el *Aryabhatiya*, de Aryabhata (siglo V), donde se recogen las primeras tablas de senos y cosenos (el concepto de «tangente» se debe a al-Khwarizmi, en el siglo IX), y más desarrollados en el *Siddhanta Siromani* (*Diadema de un sistema astronómico*; 1150), debido a Bhaskara, quien,

por ejemplo, dio una fórmula aproximada para el seno de un ángulo agudo, fórmula que él atribuía a Aryabhata. Importantes en la configuración definitiva de la trigonometría, tal y como nos ha llegado, son las contribuciones —ya en latín— de una serie de matemáticos del siglo XV, como Johannes Müller, más conocido como Regiomontano (1436-1476), un fabricante de instrumentos, astrónomo y humanista además de matemático, que no sólo calculó una tabla de senos y otra de tangentes, sino que también produjo una identidad trigonométrica fundamental como

$$\text{sen}^2 x + \text{cos}^2 x = 1.$$

La asociación de la trigonometría con la astronomía hizo que en esta última aumentase el número de tablas de números con los que los astrónomos debían operar. Dos de esas operaciones, aunque básicas, como la multiplicación y la división, implican cálculos de cierta extensión en los que, además, no es difícil equivocarse. Ligado a este hecho se encuentra el desarrollo de los logaritmos, entes matemáticos que hicieron posible cálculos rápidos y fiables. Hoy definimos con facilidad el logaritmo en una cierta base, a , de un número x como «el exponente al que hay que elevar la base para que nos dé x ». Así, en la base 10, el logaritmo de 1 ($\log_{10} 1$) es 0, ya que $10^0 = 1$, y el de 10 es 1 ($10^1 = 10$). Otra base muy utilizada en las matemáticas es el número e (logaritmos neperianos o naturales). Ahora bien, como tantas veces sucede con teorías o técnicas, al principio los logaritmos aparecieron bajo formas no tan sencillas; es lo que ocurrió con uno de los principales responsables de la creación de estos entes matemáticos, John Napier (1550-1617), un barón escocés interesado en desarrollar métodos de cálculo.

La introducción de los logaritmos dio un salto cualitativo en el cálculo, tanto numérico como trigonométrico, al sustituir la multiplicación y la división por la suma y la resta, ya que

$$\log a \times b = \log a + \log b$$

$$\log a/b = \log a - \log b$$

$$\log (a^b) = b \times \log a$$

De esta manera, para encontrar el valor del producto $a \times b$, basta con sumar sus logaritmos y buscar luego en la correspondiente tabla de logaritmos el antilogaritmo.

Una base muy utilizada en los logaritmos, como queda dicho, es el número e (2, 7182...), que tiene su propio nombre: «logaritmos neperianos» (en honor a Napier); e , uno de los números especiales de la matemática (como π), aparece con relación a la serie geométrica $(1+1/n)^n$, donde n es un número muy grande. El límite de esta serie, cuanto mayor se hace n , es precisamente e .

§2. Geometría de coordenadas

Algunas de las limitaciones de la, no obstante muy poderosa, geometría de los *Elementos* de Euclides se encuentran asociadas a las dificultades de los griegos para tratar con curvas de alguna complejidad. Fueron Pierre de Fermat y, sobre todo, René Descartes —ambos, recordemos, del siglo XVII—, quienes resolverían este problema al introducir el álgebra en la geometría, lo que permitió construir una geometría de coordenadas o «geometría analítica», como fue conocida en el siglo XIX.

En su célebre *Discours de la méthode* (*Discurso del método*; 1637), más concretamente en uno de sus tres apéndices, el dedicado a la geometría, Descartes encontró el medio de identificar cada uno de los puntos de un plano, al construir dos rectas que se cortaban perpendicularmente. La vertical es el eje de las abscisas y la horizontal el de las ordenadas, ambas líneas estaban graduadas para medir las distancias de un punto cualquiera a los ejes. Una línea recta se concibió como infinitos puntos que tienen la misma dirección, y una circunferencia como el conjunto de puntos situados a la misma distancia del centro; analíticamente se representan, respectivamente, por las ecuaciones $ax + by = c$, y $x^2 + y^2 = R^2$, donde a , b , c son constantes, x e y las variables que representan los puntos de las líneas y R el radio de la circunferencia.

En otras palabras, la aritmetización de la geometría plana y esférica permitió resolver los problemas y demostrar los teoremas sin necesidad de la argumentación geométrica.

§3. Funciones

Al recurrir a magnitudes variables —las x , y , z de las coordenadas cartesianas— para la descripción de figuras geométricas, Descartes estaba empleando de manera implícita uno de los conceptos básicos de las matemáticas: el de «función»; de hecho, en *La Géométrie* se describe la relación entre dos cantidades de manera que el cambio aleatorio de una de ellas produce un cambio determinado de la otra. Si la relación entre x e y se ajusta a, por ejemplo, la ecuación $y = 2x$, el valor de y será el doble del de x para todo valor de éste. Es obvio que estaba hablando de funciones, un término este, sin embargo, que acuñó Leibniz (aparece por primera vez en uno de sus manuscritos de 1692), algo nada sorprendente en alguien entre cuyas creaciones se encuentra el cálculo diferencial e integral, porque ¿qué sentido tienen estos cálculos sin funciones?



Leonhard Euler

Formalmente, una función de una variable, x , que supondremos de entrada (así fue en realidad) perteneciente al conjunto de los números reales, se suele escribir como $f(x)$, y de manera completa $y = f(x)$. Se trata, por consiguiente, de una relación entre dos conjuntos: el conjunto de los valores posibles de x se conoce como el «dominio» de la función y el de los valores de y como el «rango» de la función. Por supuesto, el concepto de función se puede extender a cualquier número de variables independientes, y éstas no sólo tienen que ser números reales. En *Introductio in analysis infinitorum*, Leonhard Euler distinguió entre las funciones elementales de una variable, las funciones algebraicas y las funciones trascendentes. Las primeras, que comprenden en particular los polinomios (relaciones del tipo $ax + bx^2 + \dots + cx^n$) y las fracciones racionales, pueden ser explícitas o implícitas (se dice que una función algebraica de x es explícita cuando el valor y es el resultado de un número

finito de sumas, diferencias, productos, cocientes, potencias de exponentes racionales y extracciones de raíces, operados sobre x y sobre constantes; en caso contrario, la función es implícita). Las funciones trascendentes son las que no son algebraicas (se obtienen cuando se toman logaritmos, exponenciales, cuando se eleva la variable a potencias irracionales y cuando se efectúan ciertas integraciones). Una función es uniforme cuando a cada valor de x le corresponde un único valor de y , de lo contrario es multiforme.

Un ejemplo notable de función multiforme es la que tiene como variables un tipo particular de número, los números complejos, en más de un sentido el producto final de la evolución del concepto de número, tras los naturales (0, 1, 2, 3, .), enteros (los naturales más los negativos, -1, -2, -3, .), racionales (enteros más fracciones de éstos) y reales (que podemos considerar como el conjunto de todos los desarrollos decimales infinitos posibles, y que incluyen los irracionales, como $\sqrt{2}$, e y π , cuyas «irracionalidades» fueron demostradas, respectivamente, por los pitagóricos, Euler y Lambert).

Los números complejos nacieron a partir del descubrimiento de los números imaginarios, hallazgo relacionado con los esfuerzos realizados durante el siglo XVI por resolver ecuaciones de segundo y cuarto grado como, por ejemplo, $x^2 = -1$, que no tiene solución entre los números reales, tarea en la que descolló Gerónimo Cardano. No obstante, hasta comienzos del XVII no se consideraron seriamente estos números, y aun entonces no se tenían ideas claras sobre ellos. Finalmente, se impusieron gracias, sobre todo, a un noruego, Caspar Wessel (1745-1818), el responsable de la representación geométrica de los números complejos, expresados como $x + iy$, donde $i^2 = -1$. En esa representación geométrica se utilizan los ejes cartesianos de ordenadas y abscisas de un plano: en el eje de ordenadas se introduce el valor real, x , y en abscisas el imaginario, iy . No obstante ser Wessel el responsable de este desarrollo, la representación en cuestión se conoce como «diagrama de Argand», en honor a Jean Argand, un suizo autodidacta que en 1806, mientras trabajaba como librero en París, publicó la primera representación gráfica de los números complejos, tal y como la había ideado Wessel.

Aunque, sin duda, cuando finalmente se aceptaron, los números complejos se entendieron como entes cuya razón de ser se limitaba a la matemática, se terminó descubriendo que esto no es así. En la física cuántica, por ejemplo, el ente matemático que describe la realidad es la denominada «función de onda», que está definida no en el dominio de los números reales, sino en el de los complejos.

§4. Cálculo infinitesimal e integral

Con la entrada de las funciones como protagonistas del gran escenario matemático, características como la continuidad y el infinito se hicieron particularmente patentes, puesto que, en principio, una función está definida en un dominio continuo y por consiguiente infinito. Asimismo, cobró una dimensión diferente, más compleja, la vieja cuestión de calcular —en el caso de que nos limitemos a un plano— las áreas de superficies encerradas por líneas geométricas, problema que en el pasado se había reducido en general a figuras como triángulos, circunferencias o polígonos. Resultaba, por consiguiente, obligado plantearse cuál era el área encerrada por una función $f(x)$ y las dos líneas rectas verticales que caían al eje de ordenadas, o el ritmo de variación de la función con respecto a la variable de que dependía.

En realidad, el problema del cálculo de áreas ya se había tratado antes con el denominado «método de exhaustión», que desarrollaron sobre todo Eudoxo y Arquímedes para calcular las áreas de los polígonos. Dividían los polígonos irregulares en otros regulares y sumaban los resultados parciales para aproximarse al resultado. Posteriormente, otros científicos utilizaron infinitesimales para resolver problemas matemáticos o físicos. Particularmente rigurosos fueron los trabajos de Bonaventura Cavalieri (c. 1598-1647), un discípulo de Galileo que se basó en los métodos de Aristóteles. Cavalieri escribió un tratado sobre la utilización de indivisibles (nuestros infinitesimales) que constituye el primer libro de texto de lo que ahora denominamos «métodos de integración», *Geometría indivisibilibus continuorum* (*Geometría de indivisibles continuos*; 1635), en donde consideraba las áreas como suma de indivisibles, las líneas que las componían (denominó *omnes*

lineae al conjunto de segmentos que forman un área plana) y los volúmenes como suma de áreas planas. De todas maneras, al igual que la mayoría de los precursores del cálculo diferencial e integral, Cavalieri dependía mucho de procedimientos geométricos, una limitación que comenzó a superar John Wallis (1616-1703), catedrático Saviliano de Geometría en Oxford desde 1649 y uno de los fundadores de la Royal Society. Lo que hizo Wallis fue asignar valores numéricos a los indivisibles de Cavalieri, convirtiendo así las manipulaciones geométricas en aritméticas. Semejante diferencia de enfoque se manifestó en el título del libro en el que Wallis presentó sus ideas, *Arithmetica infinitorum* (*Aritmética del infinito*; 1655), frente a la *Geometria indivisibilibus continuorum* de Cavalieri: aritmética frente a geometría (fue Wallis, por cierto, quien introdujo el símbolo ∞ para denotar «infinito», el objeto último de sus esfuerzos).

Uno de los problemas especialmente asociados al nacimiento del cálculo integral residía en saber si la suma de un número infinito de elementos podía producir un resultado finito. De hecho, esta cuestión tenía una larga tradición, como demuestran las famosas aporías de Zenón. Aunque el método de exhaustión ya indicaba que infinitos podían dar cantidades finitas, un resultado aún más claro, ligado además a sumas (el mismo procedimiento que subyace en el cálculo integral), es el que también obtuvo Arquímedes. Se trata de la suma de la serie

$$A = 1 + 1/4 + 1/4^2 + 1/4^3 + \dots$$

que Arquímedes necesitaba para calcular el área de un trozo de parábola. Lo que hizo fue multiplicar la serie por $(1 - 1/4)$. De esta manera se tenía

$$A \times (1 - 1/4) = (1 + 1/4 + 1/4^2 + 1/4^3 + \dots) \times (1 - 1/4)$$

que es igual a

$$1 + 1/4 + 1/4^2 + 1/4^3 + \dots - 1/4 \times (1 + 1/4 + 1/4^2 + 1/4^3 + \dots) =$$

$$= 1 + 1/4 + 1/4^2 + 1/4^3 + \dots - 1/4 - 1/4^2 - 1/4^3 + 1/4^4 - \dots$$

que obviamente es igual a 1. Se tiene, en definitiva

$$A \times (1 - 1/4) = 1$$

Y como $1 - 1/4$ es igual a $3/4$, resulta $A \times 3/4 = 1$; y en consecuencia

$$A = 4/3$$

La suma de la serie infinita A es, en definitiva, finita, un resultado que, si lo llevásemos a la aporía de Aquiles y la tortuga, explicaría por qué aquél alcanza a ésta: aunque Aquiles recorra un número infinito de intervalos para alcanzar a la tortuga, la suma de todos ellos es finita.

Hasta el momento nos hemos centrado en cálculos de áreas o volúmenes, esto es, en el cálculo integral, pero éste va acompañado, de manera, podríamos decir, tan íntima como necesaria, por el cálculo diferencial. Los orígenes de éste se hallan asociados a otro elemento de naturaleza físico- geométrica, la tangente a una curva en un punto (o la recta que toca a una curva en un punto), por un lado, y por otro a la velocidad con que se mueve un punto sobre una curva, o ritmo de variación con respecto a la variable.

Un paso fundamental en la formalización matemática de todos estos problemas se produjo con el teorema fundamental del cálculo, que establece que derivación e integración son procesos inversos; esto es, para calcular la integral $\int f(x)dx$ es necesario encontrar una función, $F'(x)$, tal que $F'(x) = f(x)$, donde $F'(x) = dF/dx$. Es decir:

$$\int f(x)dx = F(x).$$



Isaac Newton

Fue Isaac Barrow, el maestro de Newton en el Trinity College, el principal responsable de este resultado, que encontramos en su libro *Lectiones geometricae* (*Lecciones de geometría*; 1670), que sin duda estudió Newton, cuyas aportaciones al cálculo diferencial e integral hacen que se le considere, junto a Leibniz, el creador de estos útiles matemáticos. El camino que llevó a Newton (en una fecha tan temprana como los alrededores de 1666) a su versión del cálculo infinitesimal e integral es variado. Sabemos que estudió la *Arithmetica infinitorum* de Wallis e hizo lo propio (en 1663) con la *Géometrie* de Descartes, en la edición latina de F. van Schooten; y tenía cerca a Barrow, de quien sin duda aprendió. A la edad de 22 años, estudiando el libro de Wallis, descubrió el teorema del binomio (en el margen de su ejemplar aparece una primera versión del mismo); esto es,

$$(P + PQ)^{m/n} = P^{m/n} + (m/n) \times AQ + [(m - n)/2n] \times BQ + [(m - 2n)/3n] \times CQ + \dots$$

donde $A, B, C\dots$ denotan el término precedente; esto es, $A = P^{m/n}$, $B = (m/n) \times AQ$. La importancia de este teorema radica en que permitió a Newton establecer las primeras fórmulas de su cálculo de fluxiones; en particular, le sirvió para determinar la fluxión (esto es, la derivada) de x^n , cuando n es una fracción, y también integrales del tipo $\int ax^\lambda \times b + cx^\mu) dx$, donde λ, μ son enteros.



Gottfried W. Leibniz

Mientras que la versión newtoniana del cálculo infinitesimal estaba fuertemente influida por consideraciones geométricas y dinámicas, la de Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) se vio claramente favorecida por el estilo algebraico. Fue en 1684 cuando este último publicó, en la revista *Acta Eruditorum*, la primera descripción de su versión del cálculo infinitesimal. El artículo en cuestión se tituló «Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas

nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illi calculi genus» («Un nuevo método para los máximos y mínimos, así como para las tangentes, que no se detiene ante las cantidades fraccionarias o irracionales, y es un singular género de cálculo para estos problemas»). Este trabajo contiene las reglas generales para la diferenciación (o derivación). En él Leibniz utilizaba diferenciales, que denominaba *differentiae* («diferencias») en lugar de derivadas, y aparecía la notación d : las diferenciales dx , dv se definen como incrementos finitos y no se explica por qué $d(x \times v) = x \times dv + v \times dx$, despreciando por consiguiente el término $dx \times dv$ (que nosotros aceptamos como un término de segundo orden). Asimismo, se da la condición $dv = 0$ para un máximo o un mínimo, y $ddv = 0$ (que nosotros escribimos como $d^2 v = 0$) para un punto de inflexión.

Leibniz utilizaba el término *calculus differentialis* («cálculo diferencial»), frente al *methodus tangentium inversa*, o *calculus summatorius*, para el cálculo integral. Éste fue presentado y desarrollado por Leibniz en 1686, en un artículo (también publicado en *Acta Eruditorum*) titulado «De geometría recondita et analysi indivisibilium atque infinitorum» («Sobre una geometría recóndita y el análisis de indivisibles e infinitos»). En él aparece el símbolo de integración \int , que procede de la letra S , la letra latina inicial para *summatio* («suma» o «sumación») y que Leibniz ya había utilizado en un manuscrito fechado el 26 de octubre de 1675, para representar las *omnes lineae* de Cavalieri.

Tanto la notación como el estilo algebraico utilizados por Leibniz sobrevivieron en el desarrollo del cálculo infinitesimal e integral, frente al tratamiento de Newton. Este hecho tuvo consecuencias: la matemática británica, fuertemente influida por la versión newtoniana, perdió empuje frente a la que se llevaba a cabo en el continente europeo, una situación esta que se mantuvo durante aproximadamente un siglo, hasta que a comienzos del XIX, en 1812, un grupo de jóvenes matemáticos, entre los que figuraban George Peacock y Charles Babbage, fundaron la Analytical Society, que fue decisiva para la adopción del tratamiento de Leibniz.

§5. La noción de límite

Hemos visto que tanto el cálculo infinitesimal como el integral se basan en la noción de infinitesimal. Ahora bien, ni Newton, ni Leibniz ni sus inmediatos seguidores fueron capaces de fundamentar este concepto en una base sólida. Semejante logro recayó sobre todo en el checo Bernard Bolzano (1781-1848), el francés Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) y el alemán Karl Weierstrass (1815-1897).

En cuanto a Bolzano, lo que hizo en realidad —en un tratado que publicó en 1817— fue prescindir del concepto de límite, sustituyéndolo por conceptos puramente aritméticos y numéricos. Por el contrario, Cauchy sí lo utilizó, como se observa en su célebre (aunque mal recibido por los alumnos a los que estaba destinado, ajenos por completo a la fundamentación del cálculo y únicamente preocupados por resolver problemas concretos) libro: *Cours d'Analyse de l'École Royale Polytechnique (Curso de análisis de la Escuela Politécnica)*, publicado en 1821 (se trataba de la primera parte — subtitulada *Analyse algébrique*— de una obra que su autor pensaba continuar, aunque finalmente no lo hizo, limitándose a publicar en 1823 un *Résumé des leçons données à l'École Royale Polytechnique sur le calcul infinitésimal*).

De manera más formal, pero sin diferir en lo esencial de Cauchy, en sus clases en la Universidad de Berlín, Weierstrass definió el límite de la manera siguiente: «El límite de una función $f(x)$ vale L cuando x tiende a x_0 si para cualquier cantidad positiva $\varepsilon > 0$ existe otra cantidad $\delta > 0$ de manera que para todo punto x que, verificando $0 < |x - x_0| < \delta$ y donde la función f esté definida, se tiene que $|f(x) - L| < \varepsilon$ ».

El límite de una función es, como vemos, un valor inalcanzable, aunque la diferencia puede ser menor que cualquier magnitud que se desee.

§6. Probabilidades

Aunque todos, científicos al igual que legos, deseamos certidumbres absolutas, determinar con total precisión el desarrollo de todo aquello que acontece en la naturaleza, con frecuencia es imposible conocer o controlar todas las variables que

intervienen en esos fenómenos. Es preciso, en consecuencia, manejar probabilidades, incluso en especialidades científicas como la mecánica newtoniana, que son deterministas (otra cosa es la intrínsecamente probabilista física cuántica). En realidad, esta rama de las matemáticas tuvo orígenes más prosaicos o, mejor, más utilitarios: el interés de los nobles por los juegos de cartas y de los financieros por el negocio de los seguros determinó el de los matemáticos por el cálculo de probabilidades. A mediados del siglo XVI, Cardano escribió un tratado para los jugadores, *Liber de ludo alea (Libro de los juegos de azar)*, publicado póstumamente, en 1663, en el que aplicaba el cálculo matemático al citado entretenimiento. El estudio de las probabilidades se convirtió en una rama de la matemática con la correspondencia (seis cartas) que se intercambiaron Pascal y Fermat en 1654 sobre el problema de los puntos. Se trata de una partida de dados en la que intervienen dos jugadores, A y B , cada uno de los cuales apuesta 32 doblones de oro y elige un número diferente; el ganador será el primero que obtenga tres veces el número escogido. Sin embargo, después de un rato, el número elegido por A ha salido dos veces, mientras B ha acertado sólo una vez; en este instante la partida debe suspenderse. ¿Cómo dividir los 64 doblones de oro apostados?

En 1675, Huygens continuó desarrollando el cálculo de probabilidades con la publicación de un tratado sobre la materia, *De ratiociniis in ludo alae (Sobre el razonamiento en los juegos de azar)*, obra superada por el *Ars coniectandi (Arte de la conjetura)* de Jakob Bernoulli (1654-1705), publicada póstumamente en 1713. En ella, Bernoulli definió el arte de la conjetura de la manera siguiente: «Definimos el arte de la conjetura, o arte estocástico, como el arte de evaluar lo más exactamente posible las probabilidades de las cosas, de modo que en nuestros juicios y acciones podamos siempre basarnos en lo que se ha encontrado que es lo mejor, lo más apropiado, lo más seguro, lo más aconsejado; éste es el único objeto de la sabiduría del filósofo y la prudencia del gobernante».

Otros matemáticos del siglo XVII que se ocuparon de la teoría de las probabilidades fueron John Graunt (1620-1674), autor de *Natural and Political*

Observations mentioned in a following Index, and made upon the Bills of Mortality (*Observaciones naturales y políticas mencionadas en el siguiente índice, y realizadas a partir de los datos de mortalidad*; 1662); Edmund Halley, con su *Estimate of the Degrees of Mortality of Mankind* (*Estimación de los grados de mortalidad de la humanidad*; 1693), y William Petty (1623-1687), autor de *Essay on Political Arithmetick* (*Ensayo sobre aritmética política*; 1699). No obstante, es al siglo XVIII al que más debe el estudio de las probabilidades. En aquella centuria, en efecto, trabajaron hombres como Augustus de Moivre (1667-1754), autor de *Doctrine of Chances* (*Doctrina de las probabilidades*; 1718) y de *Approximatio ad Summan Terminorum Binomii $(a + b)^n$ in seriem expansi* (*Aproximación a la suma de los términos del binomio $(a + b)^n$ en el desarrollo en serie*; 1733), o el sacerdote presbiteriano inglés Thomas Bayes (1702-1761), que estudió el problema de la determinación de la probabilidad de las causas a través de los efectos observados. El teorema que lleva su nombre se refiere a la probabilidad de un suceso condicionado por la ocurrencia de otro suceso. Más específicamente, con su teorema se resuelve el problema conocido como «de la probabilidad inversa». Esto es, valorar probabilísticamente las posibles condiciones que rigen, supuesto que se ha observado cierto suceso.

Otro nombre clásico de ese siglo es el de uno de los grandes protagonistas de la Revolución Francesa, uno, cierto es, que sufrió un destino trágico, Marie-Jean-Antoine-Nicolas Caritat de Condorcet (1743-1794), a quien debemos *Essai sur l'application de l'analyse á la probabilité des décisions* (*Ensayo sobre la aplicación del análisis a la probabilidad de las decisiones*; 1785). Para Condorcet, que reconocía la deuda que tenía contraída con otros —«La idea de buscar la probabilidad de sucesos futuros según la ley de sucesos pasados parece deberse a Jacques Bernoulli y a Moivre, pero en sus obras no dieron ningún método para calcularla. Bayes y Price dieron uno en las *Philosophical Transactions* de los años 1764 y 1765, y M. de la Place fue el primero que trató la cuestión de una manera analítica»—, el principio general del cálculo de probabilidades consistía en lo siguiente: «Si sobre un número dado de combinaciones igualmente posibles, hay un

cierto número que dan un suceso y otro número que dan el suceso contrario, la probabilidad de cada uno de los dos sucesos será igual al número de las combinaciones que los producen dividido por el número total». Y ponía como ejemplo el clásico de «un dado con seis caras, en el que se supone que cada cara puede salir con la misma probabilidad, como uno de los seis puntos, y que los otros cinco dan los otros puntos, entonces la probabilidad de sacar una cara es $1/6$ y $5/6$ la probabilidad de no sacarla, siendo la suma de la probabilidad de los dos sucesos igual a la unidad».

No es posible, por supuesto, olvidar a Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), autor de dos obras, una más técnica, *Théorie analytique des probabilités* (*Teoría analítica de las probabilidades*; 1812), y otra de carácter más general, pensada para servir de introducción a la anterior, *Essai philosophique sur les probabilités* (*Ensayo filosófico sobre las probabilidades*; 1814). En la primera, Laplace analizó las posibilidades de que se produzcan acontecimientos compuestos cuando se conocen las probabilidades de sus componentes, introdujo la probabilidad inversa y describió su aplicación a acontecimientos como la mortalidad, la duración de los matrimonios o el desenlace de los pleitos.

El crecimiento exponencial de los gastos del Estado planteó a los Gobiernos la conveniencia de conocer las cifras demográficas, las tasas de natalidad y muerte, la distribución territorial, la composición de la población de acuerdo con distintos criterios: edad, sexo, actividad, patrimonio. El conocimiento de la producción de mercancías, el consumo de materias primas, la circulación y los precios; los ingresos, gastos y deuda son otras de las magnitudes necesarias para tomar decisiones adecuadas. La primera época de la estadística se limitó a la recogida de información (censos y tablas de datos) cuyo manejo determinó la aparición de una nueva técnica, que se conoce con el mismo nombre. Las mejoras en la información, como la sustitución de la población por una muestra, facilitaron el manejo de grandes números. El cálculo estadístico, basado en el de probabilidades, es una rama de las matemáticas que se divide en dos posibilidades: descriptiva, que utiliza instrumentos como la media, la mediana y la moda, la varianza, la desviación

estándar y la distribución normal; e inferencial, que relaciona los datos para calcular estimaciones, correlaciones, interpolaciones, o regresión.

Nadie destacó más en estos campos, los de la aplicación del cálculo de probabilidades a cuestiones sociales, que el astrónomo y estadístico belga Adolphe-Jacques Quetelet (1796-1874). Enviado a París en 1823 para iniciarse en la astronomía, Quetelet descubrió el cálculo de probabilidades e intercambió algunas ideas con Laplace. La idea central de sus trabajos fue aplicar el método estadístico y el cálculo de probabilidades a la búsqueda de regularidades en las características físicas, intelectuales y morales del hombre. En 1835 publicó una síntesis de sus primeros trabajos: *Sur l'homme et le développement de ses facultés, ou Essai de physique sociale*, que reelaboró, ampliándola, en 1869: *Physique sociale ou essai sur le développement des facultés de l'homme* (*Física social o ensayo sobre el desarrollo de las facultades del hombre*), un libro en el que escribió:

cuando se observan las masas, los fenómenos morales pasan a formar parte de alguna manera del orden de los fenómenos físicos; nos veríamos conducidos a admitir como principio fundamental, en las investigaciones de esta naturaleza, que cuanto más grande sea el número de individuos que se observan, más se desvanecen las características individuales, ya sean físicas, morales o intelectuales, dejando predominar la serie de hechos generales en virtud de los cuales la sociedad existe y se conserva.

Como instrumento para tratar su sujeto medio, o prototipo, Quetelet utilizó la curva de desviación de error, o distribución normal, denominada también «curva de campana» por su forma: $\exp(-x^2)$. Habitualmente se adjudica esta función de distribución a Carl Friedrich Gauss (1777-1855), que llegó a ella como parte de sus investigaciones en teoría de errores, en concreto dentro de lo que se conoce como método de mínimos cuadrados, que desarrolló en dos artículos publicados en 1821 y 1823 («*Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae, I, II*»), aunque en realidad, como explicó otro notable estadístico, Karl Pearson, en sus clases en el University College de Londres entre 1921 y 1933 (reproducidas más

tarde, en 1978, en *The History of Statistics in the 17th and 18th Centuries*), antes habían llegado a ella De Moivre en su ya citado libro de 1733 y Laplace cuarenta años después. Esa curva, generalizada más tarde, como veremos en el capítulo 13, en el caso de la física estadística por Maxwell, constituye un resultado fundamental tanto para las ciencias físico-químicas como para las sociales; es, podríamos decir, un eslabón entre ambas.

Capítulo 7

Líquido, sólido, gaseoso. De la alquimia a la química

Contenido:

§1. *Materia rerum*

§2. *Alquimia*

§3. *Gases: presión y vacío*

§4. *Elementos y compuestos*

§5. *Átomos y moléculas*

§6. *La tabla periódica de los elementos*

El *Homo sapiens* se encontró ante un Universo que tenía una larga historia, 13.600 M. a., en una Tierra que contaba 4.500 M. a. de existencia. Pero hasta el siglo XVII no dispuso de instrumentos que mejorasen la capacidad de sus sentidos. La observación a simple vista le había proporcionado cierto conocimiento de los cuerpos celestes, su posición y movimientos, así como de la Tierra y de los seres que vivían en ella. Aunque la especulación suplió muchas veces la falta de información, el exceso de cosas y seres era un obstáculo para el conocimiento. Tuvo que describir todos esos «objetos» que percibía para organizarlos y concebir así una imagen del Universo, tanto el de los cuerpos celestes, incluida la Tierra, como el de los seres vivos, incluida la especie humana. La composición de la materia y la naturaleza de la vida fueron objetos del conocimiento científico, que dista mucho de haber dicho la última palabra.

§1. *Materia rerum*

Era ésta, *materia rerum*, la expresión latina para referirse a la composición material de las cosas. La primera sorpresa de los interesados por la observación fue, sin duda, descubrir que el agua, la materia más abundante en la Tierra, se presentaba en tres formas o estados: líquido (agua), sólido (hielo) y gaseoso (aire). El cambio de estado era reversible, lo que implicaba que la materia era la misma bajo distintas

apariciones: el hielo pesaba menos que el agua y más que el aire.

El mito de Prometeo, el robo del fuego a Zeus, expresa la admiración de los griegos por las posibilidades asociadas a dicho elemento, tanto para destruir como para crear. El control del fuego había permitido a los humanos dividir la materia mediante la calcinación, la destilación y la combustión. El carbón vegetal, resultado de la combustión incompleta de la madera, tenía un poder calorífico superior al de ésta. Las hogueras para calentarse y cocinar alcanzaban temperaturas entre 450 y 700 °C, según el tipo de combustible. La invención del horno de pozo, un agujero en el suelo sobre el que se disponían sucesivamente el mineral y el combustible, adolecía de dos importantes limitaciones: el aislamiento estaba en el suelo en vez de en la cubierta y el carbón se mezclaba con el mineral. La inversión de esta disposición y la separación mediante una construcción de ladrillo de la zona de combustión y la cámara de cocción o fundición dio lugar al horno (3000 a. C.), que utilizaba carbón vegetal y alcanzaba temperaturas que permitían la fusión de los metales.

La metalurgia, el proceso que separa el metal del mineral, permite darle la forma y mejorar sus propiedades: resistencia, maleabilidad y ductilidad, mediante el forjado o la aleación. El aislamiento de los metales es una exigencia científica, muy posterior a su manipulación, circunstancia que complica la cronología de su uso. El cobre es el más antiguo de los elementos conocidos; han aparecido, por ejemplo, algunas baratijas fabricadas con él en el asentamiento neolítico —entre 7000 y 3000 a. C.— de Çatal Huyuk, datadas hacia 6000 a. C. El oro se encontraba en forma de pepitas, fáciles de trabajar con medios mecánicos, y las joyas más antiguas que se conocen proceden de una tumba real egipcia contemporánea, lo mismo que la plata. De 3800 a. C. procede una estatuilla de plomo de Osiris. El estaño se utilizó en aleación con el cobre para producir bronce desde finales del IV milenio a. C. El hierro que encontraron en Egipto en los meteoritos se utilizó por entonces para forjar unos abalorios. La fusión del metal (1.530 °C) requería mayores temperaturas. Los hititas fueron los primeros en producir armas de acero, una aleación de hierro y carbono que les proporcionó la superioridad militar

después de 1900 a. C. En torno al 400 a. C. se fundieron las falcatas ibéricas y las espadas chinas, aunque el uso generalizado del acero es muy posterior y durante mucho tiempo estuvo limitado a las armas. El mercurio, el único metal líquido a temperatura ambiental, data del 2000 a. C., y desde 1500 a. C se encuentra en las tumbas egipcias. En China conocieron el azufre, en la India el cinc y en Oriente Próximo el antimonio. Al mismo tiempo que la metalurgia, los humanos descubrían la utilidad de otros materiales. La cerámica, cuya invención data del Neolítico, condujo a la aparición de toda clase de creaciones, desde los ladrillos a los cacharros para la cocción y conservación de los alimentos. El vidrio, una combinación de sosa, cal y arena, se encuentra en excavaciones de Egipto y Mesopotamia desde 3400 a. C. El descubrimiento del soplado al comienzo de la era cristiana permitió crear vidrios huecos y todo tipo de recipientes.

A partir del siglo VI a. C. los filósofos griegos, sin tener en cuenta el desarrollo tecnológico anterior, se dedicaron a especular sobre la composición de la materia. Los jónicos —Tales, Anaxágoras, Anaximandro, Anaxímenes, Heráclito— coincidieron en la creencia en una materia única, sin coincidir en una: el agua, la *migma* («mezcla»), el *apeiron* («extremo», «sin límites»), el aire y el fuego fueron sus propuestas, por este orden. Los itálicos —Pitágoras, Parménides— encontraron en el número y en el ente el fundamento de la naturaleza. En el siglo V Empédocles, recordemos, ofreció una descripción compleja formada por cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. Bajo la influencia de Aristóteles, esta teoría se convirtió en la doctrina aceptada hasta el siglo XVII. Leucipo y su discípulo Demócrito (466-370 a. C.) usaron un nombre («átomo») que, actualizado por Dalton en el siglo XVIII, les proporcionó una fama tardía, al haber definido las partículas como indivisibles. En el *Timeo*, Platón introdujo la voz «elemento» (*stoikeia*) para designar a los propuestos por Empédocles y los identificó por su forma geométrica: la tierra era un cubo, el agua un icosaedro, etc. Aristóteles añadió —y así queda dicho en páginas anteriores— la quinta esencia (éter) y definió la materia como el «sustrato primero en cada cosa, aquel constitutivo interno y no accidental de lo cual algo llega a ser». Dos milenios después, Newton

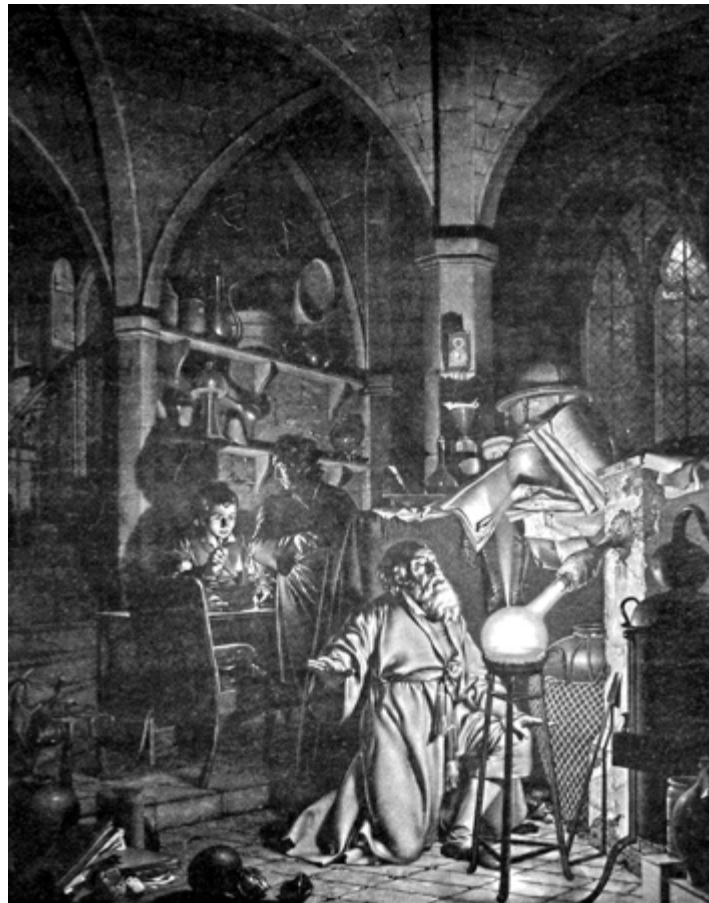
abordó la cuestión recurriendo a dos magnitudes: «lo que tiene masa y volumen». La vida es la propiedad que permite la organización de la materia de forma que tenga sensaciones, movimiento (crecimiento y desplazamiento) y capacidad de reproducirse. La muerte devuelve a la materia a su condición anterior. Los humanos mostraron una temprana resistencia a la extinción. La idea de una existencia más allá de la vida inspiró la conservación de los cadáveres mediante el embalsamamiento en Egipto, mientras que en China, a la altura del siglo VIII a. C., surgió la idea de la prolongación de la vida hasta hacerla eterna, y en India añadieron el concepto de la eterna juventud. La mitología griega abunda en referencias al tema, y la historia de Titono ilustra el error de pedir la eternidad y olvidar la juventud. De acuerdo con la mitología, Titono era hijo mortal de Laomedonte, para el que la diosa Eos, enamorada de él por su belleza, pidió a Zeus que le concediera la inmortalidad, a lo que éste accedió; pero Eos se olvidó de pedir también la juventud eterna, y Titono fue haciéndose cada vez más viejo, encogiéndose y arrugándose hasta que se convirtió en cigarra o, según otras versiones, en grillo. Chinos e indios buscaron la eterna juventud en un elixir, mientras griegos y romanos situaban su fuente en lugares remotos. Una aspiración más prosaica era la de conseguir una riqueza inagotable, algo que alimentó la ilusión de encontrar un tesoro y, lo que resultaría aún más efectivo, el medio de convertir los metales comunes y pesados en oro, por medio de un producto, que recibió la denominación de «piedra filosofal». La búsqueda de la inmortalidad mediante el consumo de drogas, hierbas y compuestos (*wai-tan*) se practicó en el siglo IV a. C. Poco después se añadió la meditación y el cultivo de la fuerza mediante el ejercicio (*nei-tan*). La influencia china se manifestó en India a partir de los siglos V y VI a. C. en la transmutación. El *rasashastra*, una rama del *ayurveda*, describe los 17 procesos a que se sometía el mercurio para que su consumo regenerase el cuerpo hasta hacerlo resplandeciente e inmortal.

§2. Alquimia

En los primeros siglos de la era cristiana, Alejandría era el centro cultural más

influyente de investigación sobre la composición de la materia. En este medio surgió la figura mítica griega de Hermes Trismegisto («tres veces grande»), al que atribuían varios escritos, entre ellos la ya citada *Tabla de la esmeralda*, que incluye una exposición en 13 puntos en la que describe la creación del mundo como la acción del Sol, y en la que su autor se identifica: «Yo soy Hermes tres veces grande y conozco las tres partes de la filosofía de todo el mundo». Entre 284 y 305 Diocleciano (siglos III-IV) ordenó en distintas ocasiones la destrucción de los escritos relacionados con la *khemia*, el nombre egipcio de la tierra negra, al tiempo que, en el Alto Egipto, Zósimo de Panópolis la definía como «el estudio de la composición de las aguas, el movimiento, el crecimiento, la unión y la separación de los espíritus de los cuerpos». A comienzos del siglo IX, Jabir ibn Hayyan, un alquimista persa, conocido en Europa por la forma latinizada de su nombre, Geber, al que se atribuye la construcción del alambique, un instrumento que permitía realizar sucesivamente la vaporización y la condensación, describió los instrumentos y los métodos de la alquimia: destilación, cristalización, calcinación, sublimación. Explicó la formación de los cuatro elementos como la asociación de una sustancia con dos de las cuatro propiedades, caliente, seco, frío y húmedo, y distinguió entre tres tipos de sustancias, las que producían vapor al calentarse (espíritus), azufre, arsénico, mercurio, etc.; los siete metales y las piedras no maleables, que se convertían en polvo. Dedicó particular atención a la transmutación de los metales mediante el empleo de una sustancia cuyo nombre árabe dio origen a la palabra «elixir», la mencionada piedra filosofal, y definió la alquimia como el estudio de la materia para obtener la transmutación de los metales. Un médico persa, Al-Razi (865-925), rechazó los elementos mágicos de la alquimia y describió sus instrumentos y sus métodos. En el *Secretum secretorum*, la más difundida de sus obras en Europa, describió las sustancias de los tres reinos que utilizaba. En el mineral distinguía seis grupos: espíritus, cuerpos, piedras y sales, entre otros. A los elementos, los árabes añadieron los principios, los tipos de acción asociadas a los metales: la volatilidad del mercurio, la inflamabilidad del azufre y la ausencia de estos caracteres de la sal. No todos los filósofos eran

favorables a la alquimia, los había que mantenían posiciones más precavidas, como Ibn Jaldun (siglo XV), quien dedicó a esta cuestión dos capítulos del *Muqaddima*, denunciando a los falsarios y llamando la atención sobre el hecho de que los que no lo eran tampoco lograron ningún resultado. En el *Libro de los minerales*, el célebre médico Avicena (987-1037) formuló tres principios: «1. Los metales se componen de mercurio y azufre en distintas proporciones; 2. El grado de pureza distingue a unos de otros; y 3. Los artesanos pueden crear sustancias parecidas pero no obtener la transmutación».



Alquimista, cuadro de Joseph Wright (1770)

Los árabes introdujeron la alquimia en al-Andalus y en Sicilia hacia el siglo IX, y la capitulación de Toledo y la ocupación de Sicilia por los normandos, a finales del siglo XI, facilitaron el que estudiosos cristianos se ocupasen de ese arte.

Recordemos que en ambos lugares se crearon centros culturales en los que se instalaron eruditos que aprendieron árabe y se dedicaron a traducir las versiones árabes de los clásicos griegos. Así, en 1144, Roberto de Chester vertió al latín el *Liber de compositione alchimiae*. Alberto Magno (1234-1314) fue el primer alquimista europeo (describió el arsénico), y en 1267 Roger Bacon escribió por encargo de Clemente IV el *Opus tertium*, un manual dedicado a la enseñanza de las artes liberales, del que formaba parte *El espejo de la alquimia*, «una ciencia que trata de la generación de las cosas a partir de los elementos y de las cosas inanimadas [...] desconocida por la generalidad de los estudiantes [...] llamada alquimia». De Raimundo Lulio se cuenta que proporcionó oro al rey de Inglaterra. Aunque la asociación con la doctrina hermética contribuyó a la condena por Juan XXII de la práctica de la alquimia en 1317, la alquimia renacentista tuvo en Paracelso (1493-1541) su figura más relevante. Asumió los cuatro elementos de Empédocles y dio nombre a un supuesto disolvente universal (*alkahest*), una desconocida quintaesencia que podría ser la piedra filosofal. Para él, además, la alquimia era un conocimiento al servicio de la medicina (iatroquímica), doctrina que se mantuvo durante el siguiente siglo. El comienzo del tránsito de la alquimia a la química puede situarse en la *Alchemia* (1597) de Libavius, que, a pesar de su título, es el primer tratado de química. Desarrolló sucesivamente el estudio de los instrumentos, los procesos y los productos, entre los que describió el ácido hidroc্লórico y el sulfato amónico, y sugirió la identificación de las sustancias minerales por la figura de los cristales obtenidos por evaporación.

§3. Gases: presión y vacío

Hasta comienzos del siglo XVII, el conocimiento de la materia apenas había progresado desde la Antigüedad. No había acuerdo sobre el número de elementos aislados, y la única materia gaseosa conocida era el aire, que confundían con el vapor de agua. Jan Baptistavan Helmont (1579-1644), un médico contemporáneo de Galileo, se dedicó a la observación experimental de la naturaleza. El más famoso de sus estudios fue el que dedicó a explicar el crecimiento de los árboles. Plantó un

sauce en un tiesto, después de haber pesado la tierra y la planta; durante cinco años pesó el agua con que lo regaba, y atribuyó a ésta el aumento del peso del árbol (74 kg), una conclusión que no tenía en cuenta la acción del aire. Mayor éxito tuvo con los vapores procedentes de la combustión. A falta de una descripción diferencial, los identificó con la voz *caos* de los griegos, que se convirtió en «gas», la palabra que designa a la materia sin forma ni volumen determinado. Al procedente de la combustión del carbón vegetal y de la fermentación que se producía en las fábricas de cerveza lo llamó «gas silvestre» (dióxido de carbono), que, a diferencia del aire, no permitía la combustión, e identificó como «gas vital» al que transportaba la sangre. Diversos experimentos condujeron al descubrimiento de nuevos gases: el aire flogistizado (nitrógeno), que no admitía la combustión, y el flogistizado (oxígeno), que la reforzaba.

El estado sólido se caracteriza por tener una forma y un volumen definido y un peso fijo, los líquidos toman la forma del recipiente, y su volumen y peso son constantes. Por el contrario, el vapor de agua, el único gas conocido hasta el siglo XVII, no tenía forma ni volumen definidos, y la medición del peso, cuando se realizó, fue en términos de presión. Los atomistas griegos necesitaban el vacío para explicar el movimiento de los átomos, mientras que Aristóteles, que no aceptaba la existencia de éstos, rechazaba la posibilidad del vacío: *natura abhorret vacuum* («la naturaleza aborrece el vacío»). Los líquidos y los gases se podían verter para pasarlos de un recipiente a otro, eran fluidos. La extracción del agua de un pozo mediante una bomba de succión cesaba cuando la distancia al nivel del agua alcanzaba los 10 m. Ctesebio, inventor y matemático griego de Alejandría (siglo III a. C.), y Galileo lo verificaron con dos milenios de intervalo; de hecho, los ingenieros florentinos acudieron a éste para que les diese una solución, encargo que trasladó a uno de sus ayudantes, Evangelista Torricelli, quien en 1643 concibió la idea de que el aire tenía peso, aunque fuese imperceptible, preparando un experimento para verificarlo: rellenó con mercurio un tubo largo y fino de una longitud cercana al metro, tapó la boca con el pulgar y lo volcó en una vasija de mayor superficie en la que también había mercurio; al destapar el tubo descubrió

que, en vez de quedar equilibradas la superficie interior y exterior, el nivel del mercurio en el tubo se encontraba a 760 mm de la vasija, al ser iguales el peso de la columna del tubo y la presión de la atmósfera, y que en la parte superior se producía el vacío. El experimento demostró que «vivimos en el fondo de un océano de aire», anunciando que la presión cambiaba con la altura. Al añadir una regla, Torricelli creó el primer barómetro. En el siglo XVII, Blaise Pascal intentó confirmar el resultado de aquél: en 1647, su cuñado colocó un barómetro en Clermont y otro en la cumbre del Puy de Dome, a 1.000 m de altura. Descubrió que había una diferencia de 8,5 cm y que la presión atmosférica disminuía con la altura. En 1664, Otto von Guericke, al que ya nos referimos, realizó otro experimento con el mismo objeto: utilizó dos semiesferas, cuyos bordes había pulido para que la unión no dejase ningún intersticio, extrajo el aire del interior con una bomba de vacío que él mismo había construido y mostró que dos tiros de ocho caballos cada uno no podían separarlas, con lo que no sólo probó la existencia del vacío, sino la importancia de la fuerza necesaria para superarlo, aunque no estaba en condiciones de medirla. La introducción de un émbolo en un cilindro produjo la primera máquina atmosférica, el antecedente de la máquina de vapor. En 1690, Dennis Papin (1647-1712) publicó en el *Acta Eruditorum* de Leipzig la descripción de ésta: el calor convierte el agua en vapor, el mayor volumen del vapor empuja el émbolo hacia arriba hasta quedar sujeto en un gancho, el cilindro se retiraba del fuego, el vapor se condensaba y producía un vacío sobre el nivel del agua, y devuelto al fuego, el proceso se repetía. Por primera vez se podían levantar grandes cargas sin necesidad del tiro humano o animal de una polea.

En el siglo XVIII, Robert Boyle realizó un experimento con tubos de vidrio que, a diferencia de los de Torricelli, eran curvos: vertió el mercurio lentamente para formar una bolsa de aire y observó que, al dejar de verter mercurio el nivel era el mismo en ambos tubos, y al duplicar y triplicar su volumen la parte del aire se reducía a la mitad y al tercio. *En los Nuevos experimentos físico-mecánicos sobre la elasticidad del aire y sus efectos* (1660), incorporó las magnitudes propias de la materia: el volumen y la presión. En 1661 expuso sus conclusiones en *El químico*

escéptico, un diálogo al estilo de los de Galileo en el que refutó la teoría de los cuatro elementos de Empédocles y los tres principios de Paracelso, para introducir en su lugar los elementos y los compuestos químicos. Concibió la materia como un conjunto de partículas que se movían en línea recta con velocidad proporcional a la temperatura y que colisionaban entre sí y desplazaban la pared móvil que las contenía. En 1662 formuló la ley que lleva su nombre, $P \times V = \text{cte.}$;

$$P_i \times V_i = P_f \times V_f$$

(*i* denotando «inicial»; *f*, «final»). Edme Mariotte completó en 1666 la fórmula de Boyle al incluir una temperatura fija. La ley de Boyle-Mariotte estableció una condición necesaria: «la presión ejercida por una fuerza física es inversamente proporcional al volumen de una masa gaseosa, siempre y cuando la temperatura se mantenga constante».

Los filósofos habían explicado la combustión por la presencia de un principio inflamable, que escapaba del combustible por la acción del fuego. En 1667, un médico alemán, Johann Joachim Becher (1635-1682), renovó la teoría de los cuatro elementos al sustituir el aire y el fuego por tres tipos de tierra, una de las cuales, la *terra pingüis*, era grasienta e inflamable. En 1703, Georg Stahl (1659-1734), profesor en la Universidad de Halle, consideró más razonable buscar en el aire la fuente de la combustión, un gas incoloro e inodoro, muy inflamable, al que denominó con la palabra griega para designar la llama («flogisto»). La materia era combustible por el flogisto que contenía y la combustión hacía que éste se asociase a otra materia y, en último caso, se perdiese en el aire. Realizó un experimento que demostró que Boyle estaba equivocado, «porque sin la entrada de aire exterior la masa del metal quemado es la misma». Fue la primera versión de la ley de conservación de la masa. Joseph Priestley (1733-1804) utilizó lentes de aumento para calentar un compuesto de óxido de mercurio y liberar más gases: aire nitroso, aire ácido, y otro altamente combustible al que llamó «aire deflogistizado».

§4. Elementos y compuestos

Después de la digresión dedicada a los gases, ha llegado el momento de retornar al punto en que los griegos conocían siete elementos. En 1669, cuando Hennig Brandt aisló el fósforo, se conocían trece. Con Antoine- Laurent Lavoisier (1743-1794) la experimentación química adquirió una precisión muy superior a todo lo conocido hasta entonces. Para rechazar la idea de que el agua se convertía en tierra, mantuvo durante 101 días un volumen de agua en ebullición de forma que el vapor, condensado, retornaba al recipiente. Al suspender el experimento descubrió que la masa de agua era la misma y que los residuos que habían aparecido procedían del frasco. Al calentar ciertos metales, como el plomo o el estaño, en un recipiente cerrado que conservaba el aire, el metal en cuestión se cubría con una capa de calcinado que lo hacía más pesado que al principio, en tanto que el peso del recipiente y su contenido era el mismo antes y después. La calcinación no producía una pérdida de flogisto, sino el aumento de la masa de aire. En 1775, formuló la ley de la conservación de la masa, según la cual «la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos». En 1777, realizó en la Academia de Ciencias un importante experimento: calcinó una masa de mercurio puro para obtener un calcinado que contenía 1/12 de su peso en aire vivo, verificando de este modo que la combustión era una reacción reversible entre una sustancia y el oxígeno. Más adelante, en 1783, anunció que el agua no era un elemento, como pretendieron Empédocles y Aristóteles, sino la combinación de dos gases: hidrógeno y oxígeno, lo que le permitió explicar fenómenos que el flogisto sólo hacía en parte: combustión, calcinación y respiración. Con la colaboración de Laplace, consiguió disolver el agua en sus dos componentes y sintetizarla de nuevo a partir del hidrógeno y el oxígeno.

Lavoisier acabó con la dualidad creada por la doctrina de los cuatro elementos, al negar esta condición a la tierra, el agua, el aire y el fuego, y explicó los fenómenos por la colisión de las partículas en movimiento: «todas las sustancias que no hemos podido descomponer por ningún medio son para nosotros elementos», escribió en un texto, *Traité élémentaire de chimie (Tratado elemental de química; 1789)*, que

se convirtió en una pequeña Biblia de la nueva química. Por «elemento químico» entendía «una sustancia que no podía dividirse por medios químicos ni crearse a partir de otros elementos». De ellos, presentó en el *Tratado* una lista de 33. Dividió los elementos por sus propiedades en metales y metaloides, dejando fuera la luz y el calor (calórico), por entender que ambos eran dos formas de energía. De todas maneras, consideraba provisional la división, dada la posibilidad de descomponer lo que se consideraba simple: «La química avanza hacia su fin y la perfección al dividir, subdividir y volver a dividir su objeto».

Muy importante también fue que en 1787, junto a otros químicos (Guyron de Morveau y De Fourcroy), Lavoisier creara una nomenclatura, siguiendo los principios que había establecido. Entre sus supuestos metodológicos figuraban que los nombres debían conformarse lo más estrechamente posible con las sustancias a las que designasen, que los cuerpos compuestos de otros más simples recibiesen nombres que expresasen su composición, mientras que los últimos tuvieran denominaciones sencillas; que los epónimos (que dan nombre a un pueblo, a una época, etc.) quedasen proscritos, y que se utilizasen nombres con raíces procedentes de lenguas muertas bien conocidas que permitiesen recordar la palabra por su significado y viceversa. Además, la invención de símbolos para designar los elementos con una o dos letras fue condición necesaria para describir la composición y las magnitudes de los compuestos.

Adviértase que la nomenclatura química había comenzado a mediados del siglo XIII, cuando Alberto Magno introdujo el término «afinidad» para nombrar la tendencia de dos elementos a asociarse. En 1543, se creó la palabra «valencia» para designar la capacidad de asociación de un elemento.

Hay cuatro tipos de función química: óxidos, ácidos, bases y sales. Johann Rudolph Glauber (1604-1670), un boticario alemán, formuló el principio general de la química: la unión de un ácido y un álcali produce sales.

«Reacción» química es el término que se emplea desde comienzos del siglo XVII para denominar los procesos que conducen a la combinación o separación de una o varias sustancias por la acción de un agente energético: el calor de la combustión,

la luz y la corriente eléctrica (la primera representación de una reacción se encuentra en el *Tyrocinium Chemicum*, de 1615, de Jean Beguin, cuando aún no se habían escrito las primeras fórmulas de los compuestos).



Lavoisier y su esposa, y ayudante, Marie-Anne Pierrete Paulze. Cuadro de Jacques-Louis David

Hay cuatro tipos básicos de reacciones: el análisis o descomposición de la materia, que se expresa simbólicamente por la fórmula $A - B \rightarrow A + B$ (el compuesto se divide en dos); la *síntesis*, en la que la combinación de dos o más elementos o compuestos crea un producto distinto: $A + B \rightarrow AB$; la sustitución, el desplazamiento de un elemento por otro más activo: $A - B + C \rightarrow A - C + B$, y la doble sustitución $A - B + C - D \rightarrow A - C + B - D$. Teniendo en cuenta esto, existen dos tipos de materia: los elementos que se obtienen mediante el análisis y los

compuestos que se encuentran en la naturaleza o se crean mediante síntesis.

También Newton se ocupó de este asunto. En la cuestión 31 de la *Óptica* (1704) manifestó la cohesión de la materia por la acción de una fuerza: «Las partículas se atraen unas a otras por alguna fuerza que en contacto directo es excesivamente grande, a distancias pequeñas desempeñan operaciones químicas y su efecto deja de sentirse no lejos de las partículas».

A comienzos del siglo XVIII, un químico francés, Étienne François Geoffroy, presentó a la Académie de Sciences diferentes tablas (*tables des rapports*) que mostraban la afinidad de los elementos representados en la primera línea con los incluidos en cada columna. Torbern Bergman expresó la concepción moderna con la palabra «atracción» (*De attractionibus electicis*, 1775) y Lavoisier construyó la forma definitiva, «afinidades electivas», que Goethe usó en el título de una de sus novelas (1809). La afinidad se materializa en forma de enlaces químicos. Para identificar los compuestos se creó una serie de términos: los óxidos eran compuestos binarios de los que un elemento era el oxígeno y el otro habitualmente un metal, mientras que las sales se obtenían mediante la extracción del hidrógeno de un ácido, teniendo la mayoría de ellas una estructura cristalina.

La fórmula química es la descripción simbólica de un compuesto o sustancia química: incluye los símbolos de los elementos, H para el hidrógeno, Cu para el cobre, etc., y un subíndice para indicar la proporción que existe entre ellos. La fórmula empírica, la más sencilla, incluye los símbolos alfabéticos de los componentes y la proporción que hay entre ellos. La más conocida es la del agua: H₂O.

Hasta que se llegó a esta representación hubo propuestas diversas. Una particularmente interesante es la que defendió Berzelius a partir de 1813. En un artículo publicado aquel año en la revista británica *Annals of Philosophy* y titulado «Experimentos sobre la naturaleza del azogue [el nombre antiguo para el mercurio], del hidrógeno y del amoniaco, y sobre los grados de oxigenación al que es susceptible el azogue», escribió:

Expresaré con las letras iniciales del nombre de cada sustancia una

determinada cantidad de esa sustancia y determinaré esa cantidad a partir de su relación en peso con el oxígeno, ambos tomados en estado gaseoso y en volúmenes iguales, lo que es lo mismo que decir las gravedades específicas de las sustancias en su estado gaseoso, considerado el del oxígeno como unidad [...].

Cuando dos cuerpos tienen la misma letra inicial, añado la segunda letra, y si ésta fuese también la misma, añadiría a la inicial la primera consonante de la palabra que difiere. En la clase de los combustibles que llamo metaloides, utilizo únicamente las letras iniciales; por ejemplo: S = sulphur [azufre], Sn = tin (stannum) [estaño], St = antimony (stibium) [antimonio], C = carbón [carbono], Cu = cooper (cuprum) [cobre], M = muriaticum, Ms = magnesium [magnesio, símbolo actual, Mg], Mn = manganese [manganeso], etc.

La fórmula molecular indica el número de átomos en una molécula. En el caso del agua coincide con la anterior. La fórmula empírica de la glucosa es CH_2O , la molecular se obtiene al multiplicar cada factor por seis, C_6HO_6 .

La fórmula del óxido de aluminio es Al_2O_3 , la del agua fuerte (ácido nítrico) HNO_3 , la sal común (cloruro sódico) NaCl .

La diversidad de procedimientos para obtener un compuesto dio origen a un debate que se resolvió con la aceptación generalizada de la «ley de las proporciones definidas» que el químico francés Joseph-Louis Proust (1754-1826) publicó por primera vez en 1795 en los *Anales del Real Observatorio de Química* de Segovia: «las relaciones entre masas según las cuales dos o varios elementos se combinan son fijas y no susceptibles de variación continua». Con esta ley, Proust estableció la identidad de cada una de las sustancias. Un compuesto químico tiene siempre la misma composición en tanto una mezcla contiene diferentes combinaciones de los mismos elementos.

La introducción de la electricidad en la química (fenómeno conocido como «electrolisis») fue decisiva para el descubrimiento acelerado de nuevos elementos,

que impuso la actualización de la tabla de Lavoisier. El descubrimiento de la electrolisis fue posible gracias a que en 1800 el físico italiano Alessandro Volta, del que volveremos a hablar en el capítulo siguiente, inventó la pila, o batería eléctrica, que suministraba una corriente continua. Seis semanas después, dos químicos ingleses, William Nicholson y Anthony Carlisle, produjeron una corriente eléctrica en un recipiente con agua y observaron la aparición de burbujas de hidrógeno y oxígeno en los polos de la batería. Habían descompuesto la materia por un procedimiento distinto al de la combustión y habían encontrado la ratio (dos a uno) del hidrógeno y el oxígeno que componen el agua. Dado que una parte de hidrógeno se combinaba con ocho de oxígeno, si el peso del átomo del primero era 1, el del oxígeno era 16.

En la utilización de la electrolisis para estudiar compuestos químicos sobresalió asimismo el británico Humphry Davy (1778-1829), quien separó e identificó seis nuevos elementos químicos entre 1807 y 1808. También fue muy importante el sueco ya citado Jons Jacob Berzelius (1779-1848). Al igual que Davy, Berzelius adjudicó una gran importancia a la electricidad que se manifestaba a través de la electrolisis en la interacción entre elementos químicos. En particular, ambos utilizaron la electrolisis como instrumento para descubrir nuevos elementos químicos. Así, Berzelius aisló el cerio, el selenio y el torio, sus alumnos el litio, el vanadio y algunos de las que se clasificaron luego como tierras raras, mientras que Davy identificó el potasio, el sodio, el bario, el calcio y el manganeso.

En un plano más teórico, encontramos que Berzelius propuso una teoría «dualista» para la electrolisis, que avanzó en un artículo publicado en 1812. Suponía que los átomos, fuesen éstos lo que fuesen, debían de estar cargados eléctricamente, ya que el paso de una corriente eléctrica sobre un compuesto lo descomponía en sus elementos constitutivos, que se depositaban en uno u otro electrodo. Por consiguiente, los elementos químicos tenían que ser electropositivos o electronegativos (consideraba que el oxígeno era el más electronegativo de todos). En cuanto a las reacciones químicas, se producían cuando elementos de electricidades opuestas se atraían para neutralizarse. Ahora bien, el compuesto

formado de esta manera no tenía que ser siempre neutro eléctricamente porque las cargas de los elementos que los constituían no eran necesariamente iguales (el electrón, la unidad de carga universal, aún no se conocía). Durante un tiempo, la teoría dualista desempeñó un papel importante en la química, pero su influencia decayó a partir de la década de 1830 con el desarrollo de la química orgánica, que se ajustaba mal a sus planteamientos.

§5. Átomos y moléculas

«Átomo» es un término —ya nos encontramos con él— usado desde el siglo V a. C. con el significado de «indivisible». La recuperación del atomismo en el Renacimiento determinó la aparición de vocablos equivalentes, como «partícula» o «corpúsculo», con la misma acepción. Descartes concibió en 1626 la molécula como un paquete de átomos unidos por medio de ganchos y argollas. Pierre Gassendi (1592-1655) introdujo en 1649 el término «molécula» en uno de sus estudios sobre Epicuro, y la definió como la unión de dos átomos mediante un único enlace. En *The Sceptical Chymist (El químico escéptico; 1661)*, Robert Boyle sostuvo que la materia estaba compuesta por racimos de partículas (corpúsculos) y definió los elementos como «ciertos cuerpos primitivos y simples que no están formados por otros cuerpos, ni unos de otros, y que son los ingredientes de que se componen inmediatamente y en que se resuelven en último término todos los cuerpos denominados cuerpos mixtos».

En este punto hay que mencionar a John Dalton (1766-1844), un hijo de un tejedor que con el tiempo se convirtió en profesor particular y asesor industrial en Manchester, cuyo apellido forma parte del patrimonio lingüístico universal, gracias a los resultados de sus investigaciones sobre la ceguera al color, mal que el mismo padecía y que a partir de entonces se denominó «daltonismo». Apoyándose en la ley de Proust, Dalton introdujo la idea de que las combinaciones químicas se efectúan a través de unidades discretas, átomo a átomo, y que los átomos (sobre cuya estructura él nada podía decir) de cada elemento son idénticos. «Podemos concluir», escribía en su obra más conocida, *A New System of Chemical Philosophy*

(*Un nuevo sistema de filosofía química*), publicado en Manchester en 1808, «que las partículas últimas de todos los cuerpos homogéneos son perfectamente iguales en peso, figura, etc. En otras palabras, toda partícula de agua es igual a toda otra partícula de agua; toda partícula de hidrógeno es igual a toda otra partícula de hidrógeno, etc.». Y, más adelante, añadía: «es un gran objetivo de este trabajo demostrar la importancia y ventajas de averiguar los pesos relativos de las partículas últimas, tanto de cuerpos simples como compuestos, y el número de las partículas elementales más simples que constituyen un cuerpo compuesto».

En *A New System of Chemical Philosophy* Dalton incluía una lista de 36 elementos simples (también, de otros —binarios, etc.— compuestos por combinaciones de dos o más elementos simples). Estaban encabezados por el hidrógeno, al cual, ante la imposibilidad de realizar medidas absolutas, asignaba como peso relativo la unidad. No es posible, en efecto, medir directamente las magnitudes del átomo, se calculan por comparación con un elemento base que se toma como unidad. El peso atómico del hidrógeno es algo más de 1; el del oxígeno, casi 16. Lo que hizo Dalton fue tomar el peso atómico del hidrógeno como unidad; así, el del carbono era 5, 7 el del oxígeno y 9 el del fósforo, ocupando los últimos lugares de su lista el plomo (95), la plata (100), el platino (100), el oro (140) y el mercurio (167).

Una cuestión pendiente de especial relevancia era decidir si las partículas de un elemento eran iguales o distintas, si había átomos y moléculas o no había diferencia entre ellas. En 1811, Amedeo Avogadro (1776-1856) publicó un artículo titulado «Sobre una forma de determinar las masas relativas de las moléculas elementales de los cuerpos, y las proporciones según las cuales esas moléculas se combinan». Utilizando la ley de Gay-Lussac, Avogadro señalaba que, al pasar un cuerpo (elemento químico o combinación de elementos) al estado gaseoso, se forman no «partículas indivisibles», los átomos que postulaba Dalton, sino moléculas integrantes, formadas por moléculas elementales. Con esta munición conceptual, Avogadro reformulaba la ley de Gay-Lussac diciendo que «en condiciones iguales de temperatura y presión, volúmenes iguales de gases diferentes contienen el mismo número de moléculas». El número de Avogadro, $N = 6.023 \times 10^{23}$, una

constante física, describe el número de átomos en un átomo-gramo, sustituidos por el mol como la unidad de una magnitud desconocida, la cantidad de materia.

En 1858, y teniendo en cuenta la ley de Avogadro, Stanislao Cannizaro (1826-1910) revisó la paridad de los volúmenes y las moléculas, explicando cómo determinar la masa atómica de los elementos y la masa molecular de los compuestos. Aun así, a mediados de siglo existía un notable desacuerdo acerca de cuáles debían ser las definiciones de «átomo» y «molécula». Para intentar llegar a un acuerdo, a principios de agosto de 1860 se celebró un congreso en Karlsruhe, a instancias de August Kekulé, que reunió a 140 químicos. El éxito fue, sin embargo, pequeño y durante prácticamente el medio siglo siguiente continuó debatiéndose sobre cuál era la naturaleza de los átomos; de hecho, muchos dudaban de su realidad.

§6. La tabla periódica de los elementos

La identificación de los elementos respondía a la hipótesis de que su número total era limitado: 33 para Lavoisier, 47 para Berzelius. Con anterioridad a 1700 se conocían el antimonio, el arsénico, el azufre, el carbono, el cobre, el estaño, el fósforo, el hierro, el mercurio, el oro, la plata y el plomo, mientras que entre 1700 y 1799 se descubrieron el berilio, el bismuto, el circonio, el cloro, el cobalto, el cromo, el estroncio, el flúor, el hidrógeno, el itrio, el manganeso, el molibdeno, el níquel, el nitrógeno, el oxígeno, el platino, el telurio, el titanio, el tungsteno, el uranio y el cinc. Y la lista continuó aumentando rápidamente (a lo que contribuyeron nuevos desarrollos, como la electrólisis y la radiactividad). Entre 1800 y 1849 se identificaron el aluminio, el bario, el boro, el bromo, el cadmio, el calcio, el cerio, el erbio, el iridio, el lantano, el litio, el magnesio, el niobio, el osmio, el paladio, el potasio, el rubidio, el selenio, el silicio, el sodio, el tántalo, el torio, el vanadio y el yodo, y entre 1850 y 1899 el actinio, el argón, el cesio, el disprosio, el escandio, el gadolinio, el galio, el germanio, el helio, el holmio, el indio, el iterbio, el kriptón, el neodimio, el neón, el polonio, el praseodimio, el radio, el rodio, el rutenio, el samario, el talio, el tulio y el xenón. Un total de 81.

La cuestión era ¿cómo se organizaban? Y surgió la idea de agrupar los elementos en función de sus caracteres, lo que dio lugar a la aparición de la tabla periódica. A partir de 1817, Johann Wolfgang Döbereiner encontró varios casos en los que los pesos de tres elementos con las mismas propiedades químicas, Ca, Sr y Ba, aumentaban en progresión aritmética. En 1857, el químico inglés William Odling llamó la atención al hecho de que la serie del carbono, nitrógeno, oxígeno y flúor mostraba un aumento regular en peso y una disminución en sus valencias, de 4 en el caso del carbono a 1 en el del flúor. En 1862, Alexandre Emile Béguyer de Chancourtois dispuso todos los elementos químicos conocidos en una espiral que dibujó sobre un cilindro; cada 16 unidades aparecía por encima de un elemento otro con el que el primero estaba relacionado estrechamente. Y en 1869, Alexander Reina Newlands colocó los elementos en filas de 7, descubriendo que a partir del octavo se encontraban las mismas propiedades del átomo situado en la misma posición en la línea superior. La regla no se cumplía a partir del decimoséptimo, el carbono. Vemos, por consiguiente, que la idea de ordenar los elementos en una tabla en función de sus pesos atómicos, de que las propiedades de cada uno se repetían con un cierto intervalo, se fue imponiendo. Y uno de los que participaron de semejante idea fue un químico ruso: Dmitri Ivánovich Mendeléiev (1834-1907), de la Universidad de San Petersburgo, que en 1869 anunció un nuevo sistema de clasificación, basado también en la idea de que las propiedades de los cuerpos simples se encuentran relacionadas de manera periódica con sus pesos atómicos. Lo hizo en una sesión de la Sociedad Rusa de Química, organización que él mismo había ayudado a crear en San Petersburgo el año anterior, así como en un libro sobre los principios de la química: *Osnov khimii (Principios de química; San Petersburgo, 1869)*. Las ideas de Mendeléiev aparecieron resumidas en la revista alemana *Zeitschrift für Chemie* en el mismo año de 1869, pero no recibieron demasiada atención hasta que Lothar Meyer, que había llegado a ideas muy similares de manera independiente, publicó su propia descripción en 1870.

En 1871, Mendeléiev predijo la existencia de tres elementos desconocidos en su tiempo, llegando a señalar sus propiedades más destacadas (incluido el peso atómico aproximado). Estas predicciones se vieron confirmadas pronto: en 1875, el francés Paul Emile Lecoq de Boisbaudran anunciaba el descubrimiento del galio (ekaboro para Mendeléiev); en 1879, el sueco Lars Fredrik Nilson hacía lo propio con el escandio (ekaluminio), y en 1886 el alemán Clemens Alexander Winkler descubría el germanio (ekasilicio).

Sin embargo, también surgieron algunos problemas con la tabla mendeleievana: en agosto de 1894 William Ramsay y lord Rayleigh anunciaban en la reunión anual de la British Association for the Advancement of Science, celebrada aquel año en Oxford, que habían descubierto un nuevo elemento en la atmósfera, al que llamaron «argón» (de la palabra griega que significa «pereza», para representar su resistencia a combinarse). Poco después, Ramsay supo que en 1888 el químico y botánico estadounidense William Francis Hillebrand había obtenido un gas que no se combinaba con otros, y que supuso era nitrógeno. Tras los análisis de Ramsay, que mostraron que no se trataba de argón, William Crookes y Joseph Norman Lockyer examinaron espectrográficamente muestras del gas y encontraron líneas que coincidían con una que el propio Lockyer y su compatriota, el químico Edward Frankland, habían observado durante un eclipse solar en agosto de 1868 en el espectro del Sol, y que les llevó a proponer la existencia de un nuevo elemento, al que llamaron «helio», según el término griego para el astro (*helium*). Ahora bien, Mendeléiev no había previsto ningún lugar en su tabla para elementos de este tipo. El problema se resolvió con la creación de un nuevo grupo (columna) en la tabla periódica, el de los gases nobles, o inertes, que pronto se completó con el descubrimiento (1898), debido a William Ramsay y a su ayudante Morris Travers, del neón, el kriptón y el xenón.

No hemos mencionado otro campo del que surgieron nuevos elementos: el de la radiactividad. Y no lo hemos hecho porque de él nos ocuparemos en otro capítulo. Señalaremos ahora, no obstante, que los dos primeros elementos químicos descubiertos de esa manera fueron, en 1898, el polonio y el radio, los primeros

nuevos elementos hallados dentro del contexto de la física del microcosmos, la física cuántica, una física que permitió entender la razón de ser de la tabla periódica.

Cuando escribimos estas líneas, la tabla periódica incluye 118 elementos químicos. Los cuatro últimos elementos químicos «fabricados» ocupan en ella los números 113, 115, 117 y 118. Tres de esos elementos recibieron nombres relacionados con los lugares donde fueron descubiertos, *nihonium* (nihonio en castellano; elemento 113, símbolo Nh), de la palabra *Nihon*, el término japonés para Japón; *moscovium* (moscovio; 115, Mc) por Moscú, y *tennessine* (teneso; 117, Ts) por Tennessee, mientras que el cuarto, *oganesson* (oganesón; 118, Og), fue bautizado así en honor del físico ruso Yuri Oganessian, director del grupo de investigación que fue capaz de sintetizarlo. El descubrimiento-síntesis de estos elementos es una manifestación de la, en ocasiones, efímera naturaleza de la realidad. El isótopo más estable del Nh tiene una vida media de 20 segundos, mientras que las del Mc, Ts y Og son del orden de milésimas de segundo. Es evidente, por consiguiente, que semejantes elementos no se pueden encontrar en la naturaleza, algo que, por otra parte, sucede con todos los demás a partir del que ocupa la posición 95, el americio, cuya vida media es de 7.370 años. De los inmediatamente anteriores, uranio, neptunio y plutonio, el que se puede encontrar en abundancia es el uranio (92), cuyo isótopo más estable tiene una vida media de 4.470 M. a. (recordemos que la edad de la Tierra es de unos 4.500 M. a.).

Capítulo 8

El carbono, principio de vida

Contenido:

§1. La química del carbono

§2. Materia y materiales orgánicos

§3. La valencia química y la teoría estructural

§4. La químico-física

§1. La química del carbono

Establecidos en el capítulo anterior los principios de la química, en el presente nos vamos a ocupar de una rama de ésta, la química orgánica, cuyo protagonista más importante es el carbono; más concretamente, la característica que distingue las moléculas orgánicas de las inorgánicas es que las primeras contienen enlaces carbono-hidrógeno que no se dan en las segundas. Las cuatro clases de moléculas más numerosas son los carbohidratos, combinaciones de una molécula de carbono y otra de agua (CH_2O), las proteínas, los lípidos y los ácidos nucleicos.

Los compuestos orgánicos, extraídos de las plantas y los animales mediante manipulaciones simples, eran utilizados desde la Prehistoria, sin tener por ello conocimiento de su naturaleza. La fermentación convertía el mosto en vino y de éste se obtenía el vinagre. Los egipcios usaban tintes naturales que resultaban de machacar la raíz de la rubia y los fenicios los extraían de las glándulas de los caracoles. Los romanos obtuvieron jabón al fundir la grasa animal con un álcali (sustancia con la propiedad de neutralizar ácidos). Entre los siglos VIII y IX, gracias a la invención del alambique, alquimistas árabes y persas destilaron alcohol, compuesto químico que contiene el grupo hidroxilo (-OH, esto es, oxígeno-hidrógeno), que al unirse al carbono forma el grupo carbinol (C-OH). En el siglo XII, el alcohol llegó a Europa, donde fue conocido como «aguardiente», hasta que Paracelso le devolvió el nombre árabe. La destilación permitió separar la morfina del opio y la quinina de la quina, y el proceso continuó, sin identificar la naturaleza

de estas sustancias.

Como delata su propio nombre, el carbono es el componente más importante del carbón, una roca sedimentaria en la que también aparecen otros elementos (hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno), que es una de las materias más abundantes en la Tierra. Conocida desde la Prehistoria, sin embargo el carbono, elemento químico, no fue incluido en la lista de los elementos hasta 1769 por Lavoisier, que descubrió su presencia en los compuestos orgánicos. Además de en éstos, el carbono está presente también en los inorgánicos, en asociación binaria con metales, gases y líquidos. Así, el monóxido de carbono, CO, un gas sin caracteres manifiestos, inhibe la circulación del oxígeno en la sangre, mientras que el dióxido de carbono, CO₂, es un producto de la respiración. Los compuestos orgánicos más simples se forman por la unión del carbono con el hidrógeno (hidrocarburos). El estado —sólido, líquido, gaseoso— en que aparecen los compuestos orgánicos depende del número de los átomos de carbono presentes. Si tiene cuatro es un gas; hasta veinte, un líquido; y por encima, un sólido. Muy importante en la naturaleza terrestre es el ciclo del carbono, la secuencia de intercambios entre los cinco grandes depósitos de carbono presentes en la atmósfera, biosfera, océanos, sedimentos fósiles y manto terrestre. En la atmósfera, el carbono se encuentra en forma de dióxido de carbono. Las plantas, algas y bacterias lo toman del aire o el agua y lo convierten en azúcar en la fotosíntesis. Los animales consumen el azúcar y emiten dióxido de carbono en la respiración.

El ciclo del carbono dio origen a un nuevo campo dentro de la química, que se identificó mediante un determinante —«orgánica» o «del carbono»—, mientras que la química precedente se definía negativamente como inorgánica, diferenciándose ambas porque los materiales de ésta eran minerales, habitualmente en estado sólido, difíciles de fundir e incombustibles, en tanto los de la química orgánica eran líquidos o sólidos fáciles de convertir y con frecuencia combustibles.

El origen vegetal o animal de los compuestos orgánicos llevó a suponer la presencia en ellos de un principio fundamental, una fuerza vital, inmaterial e inaprensible, sin la que resultaba imposible explicar la unidad orgánica de los seres

vivos. Conviene señalar en este punto que en el siglo XVIII, Xavier Bichat y los médicos de la escuela de Montpellier, y en particular Josep Barthez, concibieron la fuerza vital como el principio de organización a nivel molecular. Semejantes ideas estuvieron presentes en los inicios de la embriología, como demuestra el ejemplo de Caspar Friedrich Wolff, uno de los fundadores de esta disciplina, quien describió en su *Theoria Generationis* (1759) la generación como la evolución epigenética (la epigénesis, recordemos, es la doctrina según la cual los rasgos que caracterizan a un ser vivo se configuran en el curso del desarrollo, sin estar preformados en el huevo fecundado) del embrión dotado de una *vis essentialis*, declarando: «Todos los que creen en la epigénesis son vitalistas». En 1781, Johann Friedrich Blumenbach explicaba los experimentos con pólipos que después de dividirlos reproducían la totalidad del organismo como resultado de la acción de una fuerza orgánica (*Bildungstrieb*).

El final del vitalismo se produjo cuando, en el siglo XIX, se desarrolló lo suficiente la fisiología, la rama de la medicina que se ocupa de explicar los fenómenos que tienen lugar en los seres vivos mediante la química y la física. La transición fue compleja; en Alemania, Johannes Müller (1801-1858) se daba cuenta del valor que tenían ciencias experimentales como la química para comprender los procesos de los que se ocupaba la fisiología, de manera que, como fisiólogo, para él desempeñaba un papel central la constatación de que las variaciones en la producción de calor animal se debían a un conglomerado de motivos repartidos por las diferentes partes del cuerpo. No obstante, inmerso todavía en un profundo conflicto interno, no pudo evitar seguir tomando en consideración la posible existencia de otras fuerzas no reducibles a las físico-químicas. Significativo es lo que manifestó uno de sus discípulos, el médico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894), en un esbozo autobiográfico que presentó durante un discurso pronunciado en 1891:

En mis estudios me encontré inmediatamente bajo la influencia de un gran maestro, el fisiólogo Johannes Müller, que también introdujo en aquella época a Du Bois-Reymond, Brücke, Ludwig y Virchow al estudio de la

anatomía y fisiología. Con respecto a la cuestión crucial de la naturaleza de la vida, Müller todavía se debatía entre el antiguo punto de vista, esencialmente metafísico, y el nuevo enfoque científico que estaba siendo desarrollado entonces. Sin embargo, la convicción de que nada podría reemplazar al conocimiento de los hechos se le fue imponiendo con creciente certidumbre, y puede que la influencia que ejerció sobre sus estudiantes fuera aún mayor debido a que todavía se debatiese de esta manera.

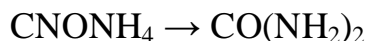
La gente joven estaba deseosa de atacar inmediatamente los problemas más profundos, y yo pasé a ocuparme de la enmarañada cuestión de la naturaleza de la fuerza vital. En aquella época la mayoría de los fisiólogos habían adoptado la solución de G. E. Stahl; es decir, que a pesar de ser las fuerzas físicas y químicas de los órganos y sustancias del cuerpo vivo las que actúan sobre él, existe también dentro de él un alma, o fuerza vital, que controla las actividades de estas fuerzas. Después de la muerte la libre acción de estas fuerzas físicas y químicas produce la descomposición, pero durante la vida su acción está constantemente regulada por el alma vital. Yo tenía la sensación de que en esta explicación existía algo contrario a la naturaleza; me costó mucho esfuerzo, sin embargo, expresar mis dudas en forma de una pregunta definida. Finalmente, durante el último año de mi carrera como estudiante me di cuenta de que la teoría de Stahl trataba a todo cuerpo viviente como si fuera un perpetuum mobile.

Beneficiándose de sus conocimientos de física, al igual que de sus investigaciones fisiológicas (como las que efectuó sobre el desarrollo de calor durante la actividad muscular), Helmholtz formuló en 1847 el principio de conservación de la energía (primer principio de la termodinámica) en su forma más general.

Por otra parte, gracias a la química resultante de la revolución que había encabezado Lavoisier se pudo acometer el análisis de la composición tanto de sustancias inorgánicas como de origen biológico, comprobándose que las primeras contenían elementos que aparecían también en las segundas, por lo que llegó a

aceptarse de modo casi general que no existía diferencia entre ambas desde el punto de vista químico. Un hito en este sentido fue la obtención de la urea, en 1828, a partir del cianato amónico, una sustancia inorgánica, por Friedrich Wöhler (1800-1882). Tratando cianato de plomo, $(\text{CON})_2\text{Pb}$, con amoníaco, NH_3 , Wöhler obtuvo cianato amónico, CNONH_4 .

Una vez formada esta disolución, la puso a hervir para cristalizarla, con el resultado de que el cianato amónico se transformó en urea:



Se trataba de un reagrupamiento interno —un proceso frecuente en la química orgánica—, en el cual no cambia el número ni la clase de los átomos de la molécula, sino solamente su ordenación dentro de la misma. Publicó sus resultados en el volumen 12 de la revista *Annalen der Physik und Chemie* bajo el título «Sobre la producción artificial de la urea».

En sentido estricto, la combinación de los elementos y compuestos inorgánicos para formar otros compuestos igualmente inorgánicos, esto es, la síntesis de materia orgánica, como proceso alternativo a su existencia de forma natural, fue impensable mientras se creyó en la presencia de una fuerza vital, una convicción que, como acabamos de ver, desmontó Wöhler.

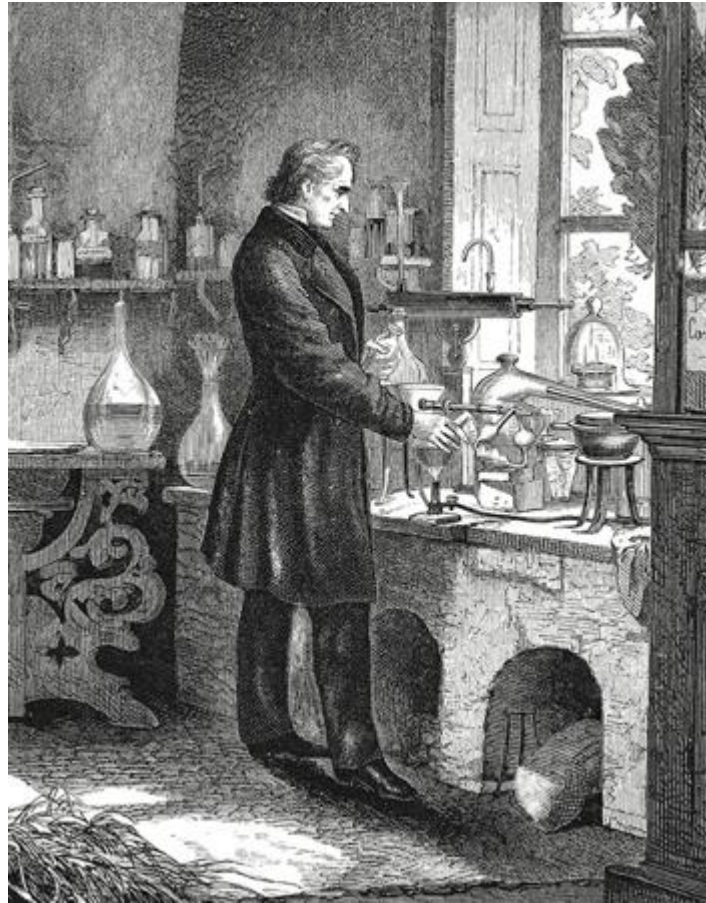
La síntesis es la unión de dos o más compuestos para formar otro más complejo, y la descomposición, lo contrario. Todas las reacciones producen un cambio en la materia y también en la energía, pero no hay creación ni destrucción de materia y energía. Como ya se ha comentado, los tipos básicos de reacciones químicas son la síntesis, en la que los elementos simples componen uno más complejo; la descomposición, lo contrario de la anterior; la sustitución, en la que un elemento es desplazado por otro, y el doble desplazamiento. Para acelerar o retrasar la reacción se utilizan catalizadores, que aportan o reducen la velocidad del proceso.

§2. Materia y materiales orgánicos

Como sugieren los comentarios anteriores, el estudio de compuestos orgánicos tiene una larga historia. En el siglo XVIII se descubrió el azúcar, que más tarde se conoció como «glucosa». En 1816 el farmacéutico alemán Frederich Sertürner (1873-1841) aisló la quinina ($C_{20}H_{24}O_2N_2$ en la notación actual) de la quina, la morfina ($C_{17}H_{24}O_3N$) del opio, así como la estricnina, $C_{21}H_{20}(OCH_3)_2O_2N_2$, y la brucina, $C_{21}H_{22}O_2N_2$, de otras plantas. En 1823, tras varios años de experiencias, Michel Chevreul, profesor de Química en el Museo de Historia Natural de París, describió en sus investigaciones químicas de las grasas de origen animal el procedimiento para separar los distintos ácidos que, con el álcali, formaban los jabones; también estudió con detalle en 1815 el colesterol ($C_{27}H_{46}O$), que se encuentra en los tejidos corporales y en el plasma sanguíneo de los vertebrados, y que había sido identificado por primera vez en 1769, en forma sólida, en los cálculos de la vesícula biliar, por François Poulletier de la Salle. En 1826, Otto Unverdorben aisló mediante destilación del índigo una materia a la que años después se dio el nombre de anilina, y en 1828 se aisló la nicotina ($C_{10}H_{14}N_2$) en la hoja del tabaco.

Muy importante para el desarrollo de la química orgánica, para, podríamos decir, su institucionalización, fueron las aportaciones de Justus von Liebig (1803-1873), que después de doctorarse en Química en la Universidad de Erlangen en 1822 amplió estudios en París junto a Gay-Lussac. En 1824 fue nombrado profesor ayudante en la Universidad de Giessen y al año siguiente obtuvo la cátedra de Química; permaneció en Giessen hasta 1852, cuando se trasladó a Múnich. En 1831, Liebig desarrolló un aparato para analizar compuestos orgánicos que era lo suficientemente sencillo como para poder ser utilizado de manera sistemática por sus estudiantes para resolver nuevos problemas; esto es, para investigar. Él mismo elucidó inmediatamente la composición de 14 alcaloides y de otros compuestos. Cuando Liebig llegó a Giessen, la mayor parte de los químicos alemanes todavía se ocupaban únicamente de cuestiones relativas a la química inorgánica, aunque la orgánica ya había comenzado, como hemos visto, a atraer interés, pero las discrepancias entre los diferentes resultados de los análisis de compuestos

orgánicos constituían un problema serio. Con el aparato de Liebig se superaba esta dificultad, lo que reforzó el interés y las posibilidades de la química orgánica. En 1835, Berzelius escribía a Wöhler: «Todos los días utilizamos el aparato de Liebig. Es espléndido. Con pequeñas modificaciones hemos llegado tan lejos que parece imposible que los resultados que se obtienen no sean correctos».



Justus von Liebig

En Giessen, Liebig explotó sus nuevos métodos, pero no sólo él, también sus estudiantes. El procedimiento que siguió, una novedad entonces, fue adjudicar problemas de investigación a sus alumnos, una vez que éstos habían adquirido una formación básica. Esta fue su gran innovación (posibilitada por sus instrumentos y métodos), el combinar enseñanza e investigación; no el hecho de que enseñase Química en el laboratorio, algo que, aunque no demasiado frecuente, ya se hacía en

otros lugares. A través de sus estudiantes, la influencia de Liebig se extendió también al mundo académico e industrial. En el primero, muchos de sus mejores alumnos (entre los que se cuentan Kekulé, Hofmann, Gerhardt y Wurtz) obtuvieron puestos docentes, con frecuencia apoyados por el propio Liebig. Estos nuevos profesores extendieron los métodos de enseñanza de su maestro; es el caso, por ejemplo, de Augustus Wilhelm von Hofmann, que fue requerido desde Londres y que enseñó a William Henry Perkin, quien, a su vez, en 1856 produjo el primer colorante sintético, la mauveína, o malva. Nacía así la era de los colorantes sintéticos, que enseguida se vio enriquecida con nuevos productos, como el tinte rojo denominado «fucsina», producido en 1859 por uno de los primeros discípulos de Hofmann en Londres, Edward Chambers Nicholson, en colaboración con David Price, otro graduado en la escuela de Hofmann; el amarillo de anilina (1861) o el índigo, una sustancia (es un tinte azul) que se extraía de un arbusto originario de África y que el químico alemán Adolf von Baeyer produjo en 1882, vendiendo sus derechos a BASF, si bien su proceso resultó inviable y hubo de ser mejorado posteriormente. Da idea de las consecuencias de estos trabajos el que el índigo sintético pudiera venderse finalmente a un precio menor que el producto natural, acabando así con las plantaciones orientales y dando origen a una depresión económica en la India y Japón, los países que suministraban al mundo este colorante.

La agricultura también se vio influida por las enseñanzas de Liebig, especialmente a través del libro que publicó en 1840: *Chemie in ihre Anwendung auf Agricultur und Physiologie (Química orgánica y sus aplicaciones a la agricultura y a la fisiología)*, en el que, entre otros temas, se analizaba el papel del carbono en la nutrición de las plantas.

Además de en los colorantes, la química orgánica también mostró su importancia en otros dominios. En 1902, Emil Fischer, en Berlín, y Franz Hofmeister, en Estrasburgo, propusieron de manera independiente que las proteínas estaban formadas por aminoácidos (identificados, en el caso de la cistina, en cálculos urinarios por Berzelius en 1810) unidos mediante la condensación del grupo amino

(NH₂) de uno con el grupo carboxilo (COOH) de otro, formando enlaces — CONH—.

Las proteínas constituyen un ejemplo de moléculas gigantes, o macromoléculas formadas por miles e incluso millones de átomos. Su estudio se vio favorecido por los trabajos de un notable químico inglés, Thomas Graham, que aplicó el método de la difusión, la mezcla de partes de las moléculas, para establecer en 1831 una ley que sostenía que la tasa de difusión era inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad (y por consiguiente, de su peso molecular). Al investigar la difusión de las soluciones de sustancias como la sal, el azúcar o el sulfato de cobre, Graham descubrió que las moléculas gigantes no podían atravesar el pergamino, a pesar de los poros de su estructura. Llamó a estas sustancias «coloides» y la comparación del agua y los coloides separados por un pergamino le llevó a descubrir la presión osmótica.

Y si se habla de moléculas de gran tamaño, es obligado referirse a los polímeros (del término griego que significa «muchas partes»), moléculas formadas por largas cadenas, normalmente de carbono, a las que se unen otros átomos, como el hidrógeno, el flúor o el cloro. La dificultad para encontrar marfil para las bolas de billar llevó a Estados Unidos a convocar un concurso, que ganó el químico estadounidense John Wesley Hyatt al producir, disolviendo celulosa, un polímero de origen natural, en una solución de alcanfor y etanol, el celuloide (1869), el primer plástico sintético que podía modelarse con distintas formas. En 1883, el inventor inglés Joseph Swan desarrolló un proceso para fabricar fibras de nitrocelulosa, que llevó en 1884 al francés Hilaré de Chardonnet a patentar un nuevo tejido, una seda artificial, el rayón. A mediados del siglo XX, la producción anual de rayón era de unas 500.000 toneladas

Otro producto digno de mencionar es la bakelita, cuyo descubrimiento anunció públicamente y patentó en 1909 el químico belga (posteriormente instalado en Estados Unidos, cuya nacionalidad adoptó) Leo Hendrik Baekeland. Fue el primer plástico «no natural», comercial, después del celuloide. Sintetizada a partir de moléculas de fenol y formaldehído, su principal propiedad era su gran resistencia a

las altas temperaturas y la capacidad de ser moldeada a medida que se formaba y solidificaba. En 1909,

Baekeland patentó su producto y el año siguiente fundó la Bakelite Corporation, para producir el polvo a partir del cual se podía manufacturar este nuevo plástico que adoptaba gran número de formas y funciones, y cuya utilidad principal era actuar de aislante eléctrico.

Baekeland tuvo también algo que ver con la invención de otro material bien conocido: la formica. Tras haber introducido la bakelita, colaboró con dos ingenieros de la Westinghouse Corporation, Herbet Faber y Daniel O'Conor, para intentar producir un material que estuviese formado por láminas. De hecho, el primer producto de este tipo al que llegó Westinghouse se logró impregnando una lona pesada con resina de bakelita. Pensando que la compañía no dedicaba esfuerzos suficientes a lo que para ellos constituía un campo muy prometedor, Faber y O'Conor la abandonaron, formando en 1913 su propia empresa, la Formica Corporation. Sin embargo, la patente de la formica no llegó hasta 1918, y a nombre únicamente de O'Conor. Se trataba de un compuesto de aproximadamente 1,5 mm de espesor, formado por varias capas de un tipo de papel bastante basto, que, impregnado con ácido fénico, se prensaba, a alta temperatura, en un molde de láminas de acero pulido. El nombre «mica» que forma parte de la denominación del nuevo producto se debía a que se pensó en él como un sustituto de la mica, el mineral que entonces se utilizaba ampliamente como aislante eléctrico, pero que resultaba caro. Sin embargo, no sería éste el principal destino de la formica: a mediados de la década de 1920 la compañía pensó que también podía aplicarse en la fabricación de muebles. En un principio, sólo estaba disponible en color negro o marrón, obstáculo que terminó siendo resuelto, y así, con una dureza y resistencia al agua mayores que las de las primeras variedades, la formica se impuso con facilidad en la manufactura de innumerables tipos de muebles.

Pronto llegaron más polímeros sintéticos, no necesariamente del tipo de lo que denominamos plásticos. Así, en la década de 1930 aparecieron, entre otros, el celofán, hecho de pulpa de madera, el polietileno, el poliestireno, el policloruro de

vinilo (más conocido como PVC) y el nailon, la primera fibra completamente sintética.

Todos estos materiales se han introducido en nuestras vidas de múltiples maneras. Pensemos, por ejemplo, en el polietileno, que produjeron por primera vez en 1933 dos químicos que trabajaban para la británica Imperial Chemical Industries, uno de los gigantes de la industria química mundial,

Eric Fawcett y Reginald Gibson, y desarrollado en 1937 por otros químicos de la ICI. La producción a gran escala de polietileno comenzó en una planta que abrió sus puertas el 1 de septiembre de 1939, el mismo día que Alemania invadió Polonia, iniciando así la Segunda Guerra Mundial. Su primer uso fue como aislante eléctrico en radares, siendo utilizado más tarde para recubrir el primer cable telefónico que dio la vuelta al mundo. Se empleó comercialmente para el gran público en 1958, primero en la fabricación de barreños, luego en una gran variedad de productos, desde botellas y cubos a bolsas.

Los explosivos también se vieron beneficiados por las nuevas técnicas e intereses químicos. En 1845, Christian Schonbein, profesor de Química y Física en Basilea, derramó una mezcla de ácido nítrico y sulfúrico que limpió con el algodón de su mujer. Lo puso a secar y desapareció. Había convertido la celulosa en nitrocelulosa, pólvora sin humo que cambió las condiciones de la batalla, cuando se encontró el medio de manejarla (cordita). En 1886, Alfred Nobel descubrió el medio de fabricar bastones de nitroglicerina seguros y fáciles. Lo llamó «dinamita».

No es exagerado afirmar que el desarrollo de la química orgánica a lo largo del siglo XIX constituye un fenómeno equiparable en algunos aspectos a hitos históricos como la Revolución Industrial, con la que, de hecho, en cierto sentido puede entroncarse. En efecto, la Revolución Industrial comenzó, recordemos, con la invención de la máquina de vapor, una aplicación de las leyes de los gases, que creó una presión superior a la atmosférica para extraer el agua de las minas. Al ser independiente de las formas conocidas de energía natural —la corriente del viento y del agua de los ríos—, la máquina de vapor permitió la automatización de las máquinas y la mecanización del transporte terrestre y marítimo. A su vez, esto

produjo una demanda de energía, una exigencia que contribuyó de diversas maneras al desarrollo de la ciencia y de la técnica. Así, la introducción de la electricidad como una nueva fuente de energía determinó la creación de las plantas hidroeléctricas y el tendido de redes de transporte. Y al mismo tiempo que la ciencia electromagnética mostraba la rentabilidad social de la ciencia, también hacía lo propio la química orgánica, en la que se manifestó de forma particularmente intensa la sustitución de los compuestos naturales por otros producidos mediante síntesis artificiales.

§3. La valencia química y la teoría estructural

En 1826, Liebig estudió el ácido fulmínico y, un año después, Wöhler el ácido cianico. Ambos enviaron sus memorias para su publicación a Gay Lussac, quien descubrió que coincidían en su composición, aunque sus propiedades eran diferentes. Al no encontrar respuesta a este problema, sometió la diferencia a Berzelius, que no se interesó por el asunto hasta 1830, cuando él mismo se encontró con un dilema parecido al investigar los ácidos tartárico y racémico. A falta de una explicación satisfactoria, ofreció al menos una descripción, llamando «isómeros» a los compuestos que cumplían estas condiciones (hoy sabemos que para distinguir el ácido cianico del fulmínico lo mejor es escribir sus respectivas fórmulas, que en principio son en ambos casos HOCN, como HO-C≡N para el ácido cianico normal, HN=C=O para el ácido isocianico y HO-N=C para el ácido fulmínico, donde «=» y «≡» representan enlaces dobles y triples).

Antes de que Berzelius se interesase realmente por estos problemas, los experimentos asociados a la isomería habían conducido al descubrimiento de un compuesto, el grupo cianídico (CN), que aparentemente pasaba de un compuesto a otro sin necesidad de que se separasen sus átomos. Es lo que se conoció como «radical», de «raíz» en latín (término que había introducido Guyton de Morveau en 1785), un concepto que facilitaba el conocimiento de los compuestos; de hecho, en 1828, Dumas definió la química orgánica como la química de los radicales. En 1832, Liebig descubrió que el grupo bencénico (C₆H₅) actuaba como un radical y

en años sucesivos se propusieron nuevos y más complejos radicales.

En 1834, el citado Dumas demostró que el cloro (negativo) podía sustituir al hidrogeno (positivo) sin cambio significativo en las propiedades del compuesto. Llamó «sustitución» al proceso e introdujo la idea de que existían unos tipos moleculares formados por aquellas sustancias en las que hipotéticas sustituciones darían lugar a fórmulas similares, aun cuando las sustancias reales tuvieran propiedades muy diferentes (los casos, por ejemplo, del metano, $C_4H_2H_6$, del éter de metilo, C_4OH_6 , del ácido fórmico, $C_4H_2O_3$, y del cloroformo, $C_4H_2O_3$).

Aunque la teoría de tipos tuvo una notable aceptación, siendo desarrollada sobre todo por otro de los estudiantes de Liebig, Charles Frédéric Gerhardt (1816-1856), hijo de un fabricante suizo-alsaciano de albayalde que también trabajó en París con Dumas, continuaban existiendo dificultades importantes que no permitían comprender los muy diversos compuestos que los químicos producían. Una vía de escape surgió del viejo problema de la identificación del mecanismo que unía unos elementos con otros (o con ellos mismos) para formar compuestos.

Como vimos, inicialmente los químicos se habían contentado con hablar de «afinidades químicas», la tendencia de elementos a unirse entre sí (ácidos y bases, por ejemplo, para formar sales). Cuando, de la mano de científicos como Dalton o Cannizzaro, la teoría atómica comenzó a dar sus primeros pasos y se descubrió el fenómeno de la electrolisis (del que nos ocupamos en el capítulo anterior), surgió la teoría (promulgada sobre todo por Berzelius) de que los átomos que formaban compuestos químicos estaban unidos por fuerzas electrostáticas: unos elementos eran electronegativos y otros electropositivos. Esta teoría dualista funcionaba razonablemente bien para los compuestos inorgánicos, pero con el desarrollo de la química orgánica fue encontrando dificultades cada vez mayores. Así, algunos elementos parecían ser capaces de sustituirse entre sí en un compuesto, independientemente de su carácter electroquímico.

En 1852, Edward Frankland, que había ampliado estudios con Bunsen y Liebig antes de comenzar a enseñar, en 1851, en el Owens College de Manchester, el primer paso de una carrera académica que le llevaría a suceder en 1865 a Hofmann

en el Royal School of Mines, publicó un artículo en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society con el título «Sobre una nueva serie de compuestos orgánicos que contienen metales», en el que señalaba que átomos de nitrógeno, fósforo, antimonio y arsénico parecían combinarse siempre con tres o cuatro átomos independientemente del signo de su electricidad. «Si se consideran las fórmulas de los compuestos inorgánicos», escribía, «hasta un observador superficial queda impresionado por la simetría general de su construcción. Los compuestos de nitrógeno, fósforo, antimonio y arsénico, en especial, muestran la tendencia de estos elementos a formar compuestos que contengan 3 o 5 átomos de otros elementos. Y es en estas proporciones como mejor se satisfacen sus afinidades». «Sin adelantar una hipótesis acerca de la causa de esta agrupación simétrica de átomos —añadía— resulta bastante evidente que prevalece esta tendencia o ley y que, independientemente de cuál sea el carácter de los átomos que se unen, la capacidad de la combinación del elemento que atrae, si se me permite la expresión, siempre queda satisfecha por el mismo número de átomos».

En estas manifestaciones nos encontramos con el origen de la teoría de la valencia, el correlato del concepto de «afinidad», un concepto al que ya antes que Frankland se había aproximado Alexander Williamson y que luego exploraron Charles-Adolphe Wurtz, William Odling y August Kekulé (1829-1896), un alumno de Liebig que después de doctorarse amplió entre 1851 y 1852 estudios en París con Dumas, para luego trabajar un año y medio en Suiza para un adinerado químico, tras lo cual marchó a Londres en 1854 como ayudante de John Stenhouse. De regreso a Alemania (1855) abrió en Heidelberg un pequeño laboratorio privado, al tiempo que impartía clases (como *privatdozent*, sin recibir ningún salario) en la universidad, tras lo cual pasó dos años como profesor en la Universidad de Gante, donde enseñó y publicó en francés, último paso académico antes de suceder en 1867 a Hofmann (que marchó a Berlín) como catedrático en la Universidad de Bonn.

En dos artículos que publicó en 1857 y 1858, y con más detalle en su libro de texto, *Lehrbuch der Organischen Chemie (Tratado de química orgánica; 1859)*, Kekulé,

a quien con justicia se considera el fundador de la química estructural, sostuvo que los átomos de cada elemento parecían tener una capacidad —que denominó «unidades de afinidad»— preestablecida para combinarse con los átomos de otros elementos o de ellos mismos. El hidrógeno y el cloro tenían una de esas unidades; el oxígeno y el azufre, dos; el nitrógeno, el fósforo y el antimonio, tres; y el carbono, cuatro. Una década después, las «unidades de afinidad» de Kekulé fueron rebautizadas con el nombre de «valencia». Desde esta perspectiva, el agua, H_2O , representaba

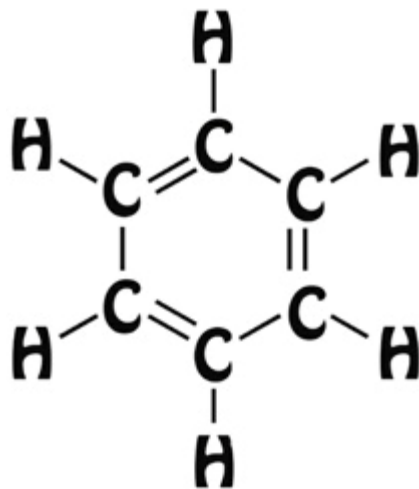
que dos átomos monovalentes de hidrógeno se unían con uno divalente de oxígeno. Equipado con estas ideas, Kekulé abordó el estudio de la importante, pero problemática, familia de los compuestos orgánicos denominados «aromáticos», llamados así porque muchos de ellos tienen olores fragantes, y que están relacionados con el benceno (C_6H_6), un compuesto que se encuentra en el alquitrán de hulla, del que se separa por destilación fraccionada y sobre el que hoy sabemos que es el primer miembro de una serie de hidrocarburos que derivan de sustituir hidrógenos por radicales alquílicos. En 1865, propuso que la molécula de benceno estaba formada por un hexágono en cuyos vértices se situaban los átomos de carbono, unidos mediante uno o dos enlaces con los vecinos y con un átomo de hidrogeno.

La aportación de Kekulé constituyó una de las grandes contribuciones a la química de todos los tiempos y, sin duda, del siglo XIX (a partir de entonces, las diferencias de estructura explicaron las distintas propiedades). En una conferencia conmemorativa en honor de Kekulé, pronunciada en 1898, otro químico, Francis Japp, manifestó que la teoría del benceno de Kekulé constituía «la pieza más brillante de la producción científica que puede encontrarse en toda la química orgánica. Tres cuartas partes de la química orgánica moderna son directa o indirectamente producto de esta teoría».

Aunque por supuesto dejaba problemas por resolver, la teoría de Kekulé permitió contemplar bajo una luz diferente, más esclarecedora, los compuestos aromáticos.

Y hay que recordar que los compuestos orgánicos más interesantes desde el punto

de vista de sus aplicaciones tecnológicas son precisamente éstos, los aromáticos (por ejemplo, colorantes y medicamentos), con lo que la teoría de Kekulé se convirtió en la llave maestra para ese tipo de investigación química aplicada.



Estructura de la molécula del benceno

Tomando como base los resultados de Kekulé, se formuló la «teoría estructural»: los átomos de carbono podían formar cadenas de dimensión indefinida y anillos cerrados, alternando los enlaces, simples y dobles, y añadir ramos a la estructura para asociarse con otros elementos como el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno (el término «estructura química» había sido introducido en 1861 por el ruso Aleksandr Butlerov, catedrático de Química en la Universidad de Kazán —había pasado una temporada en Heidelberg, donde conoció a Kekulé, y visitado el laboratorio de Wurtz en París, donde conoció al químico escocés Archibald Scott Couper—, en una conferencia ante químicos alemanes reunidos en Speyer, aunque él no reclamó su paternidad, mencionando las fórmulas que había publicado en 1858 Couper).

La teoría estructural se enriqueció posteriormente con las aportaciones de dos antiguos estudiantes del químico parisino Adolphe Wurtz, el holandés Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911) y el francés Joseph Achille Le Bel, que en 1874 y de manera independiente señalaron que era necesario tener en cuenta la estructura tridimensional de las moléculas. El número conocido de isómeros de un compuesto

particular no coincidía con lo que se esperaría a partir de sus fórmulas constitutivas, pero esta dificultad se superaba si se suponía que el átomo de carbono tenía una estructura tetraédrica; esto es, si sus enlaces se producían en los vértices de un tetraedro. Nació así la estereoquímica, una rama de la química que enriqueció considerablemente esta ciencia. De hecho, la nueva disciplina se benefició de su relación con la cristalografía, como ya advertía Berzelius en su *Tratado de química* cuando escribía:

Aunque la cristalografía, o sea, la ciencia que tiene por objeto conocer la forma de los cristales y sus modificaciones, sea, hablando con propiedad, extraña al dominio de la química, no deja de ser de la mayor importancia para el químico. Ocurre con frecuencia que la forma cristalina indica la naturaleza de la combinación, en cuyo caso muchas veces basta una simple inspección para reconocer lo que de otro modo no podría saberse, sino por medio de experimentos largos y difíciles.

Mención especial debe hacerse en este apartado al artículo «Memoria sobre la disposición de los átomos en las moléculas de las que forman parte», sobre la importancia de la disposición de los átomos a la hora de estudiar cristales, que publicó en 1833 Alexandre Édouard Baudrimont. Las ideas de éste influyeron en Auguste Laurent, que había llegado a París en 1826 para estudiar mineralogía y cristalografía en la Escuela de Minas y que poco después de graduarse se convirtió en ayudante de Dumas, para pasar a continuación a trabajar, entre 1832 y 1834, bajo la dirección de Alexandre Brongniart, un mineralogista de renombre. Laurent realizó notables aportaciones a la química orgánica (y un libro suyo, *Méthode de chimie*, publicado en 1854 y traducido al inglés el año siguiente, ejerció una cierta influencia), pero lo que nos interesa recordar aquí es que publicó un *Précis de cristallographie* —firmemente enraizado en la gran tradición francesa que se remonta a los trabajos cristalográficos del abad Rene-Just Haüy (1743-1822) — y que coincidió en la capital francesa con Louis Pasteur en el laboratorio de Antoine-Jérôme Balard, donde Pasteur fue admitido en 1846. Fue Laurent quien animó a

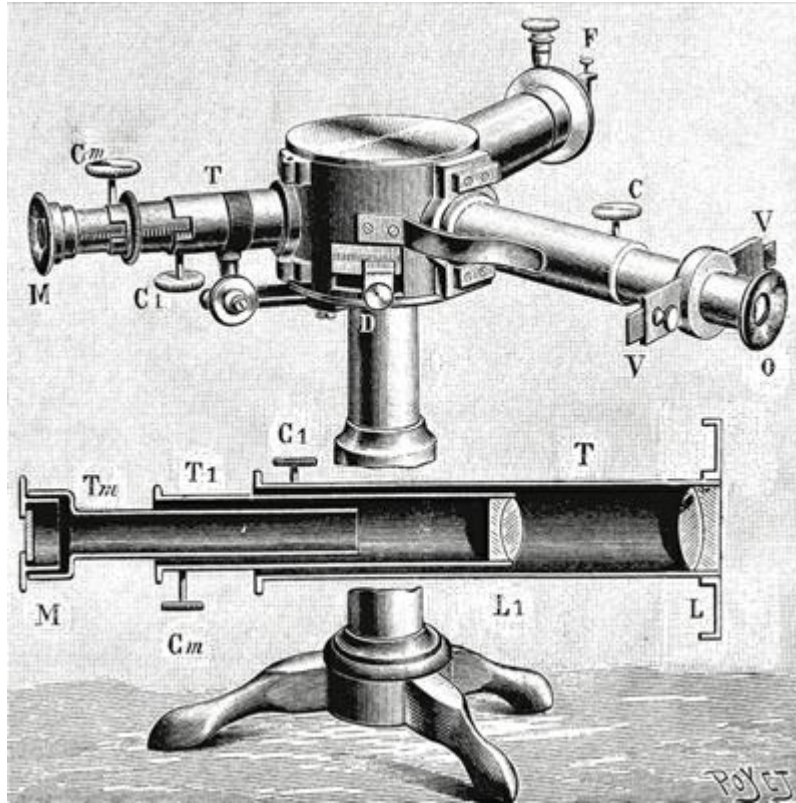
Pasteur a que estudiase compuestos como el ácido tartárico, que se presentaban en dos formas diferentes, girando el plano de polarización de la luz en sentidos distintos cuando se hacía atravesar las dos formas cristalinas del ácido. Como veremos en el capítulo 16, Pasteur terminó dedicando su tesis doctoral a este tema, que le encaminaría hacia las investigaciones por las que obtendría finalmente fama universal.

Como también tendremos ocasión de comprobar, enriquecida con técnicas procedentes de la física (la difracción de rayos X), la cristalografía se convertiría en un poderoso instrumento en el estudio de las macromoléculas asociadas a la vida.

§4. La químico-física

Muchos de los desarrollos precedentes se basaron sobre todo en los procedimientos más o menos tradicionales de la química. Sin embargo, no fueron ajenos a la física, en particular a la electricidad, que dio origen, a través de los fenómenos electrolíticos, a la electroquímica. Pero esa irrupción de la física en la química fue, en sus inicios, modesta, una situación que cambió especialmente a partir de las últimas décadas del siglo XIX. Y no es sorprendente que se produjera tal cambio, puesto que las reacciones químicas implican aspectos de los que se ocupan ramas de la física. Así, esas reacciones involucran intercambios calorífico-energéticos, y de los intercambios de calor o energía trata la termodinámica, que también tiene algo que decir sobre cuestiones como la velocidad (o cinética) a la que tienen lugar las combinaciones químicas. También ha de mencionarse la espectroscopia, la ciencia que, como vimos en el capítulo anterior, se estableció firmemente a mediados del siglo XIX gracias a la colaboración de un químico, Robert Bunsen (1811-1899), con un físico, Robert Kirchhoff (1824-1887), y que es capaz de identificar los elementos químicos, bien aislados o dentro de un compuesto. No debemos olvidar, asimismo, las repercusiones que tuvo para la electroquímica el que en 1897 el físico inglés Joseph John Thomson identificase el electrón como componente universal de la materia, ni lo mucho que aportaron, ya en la centuria siguiente, el desarrollo de la cristalografía de rayos X (o difracción de rayos X) y la

nueva mecánica cuántica, temas todos estos de los que también trataremos más adelante.



Espectroscopio

Fue en el marco de estas disciplinas como se fue configurando una nueva rama de la química (y, a su vez, de la física): la químico-física (aunque también se podría hablar, recíprocamente, de la físico-química). Entre los pioneros de esta especialidad se encuentran hombres como el danés Julius Thomsen y el francés Marcellin Berthelot, que se esforzaron por crear una termoquímica; esto es, por establecer un marco que permitiese entender los intercambios de calor que tienen lugar en las reacciones químicas. Otro de los grandes pioneros fue el versátil Hermann von Helmholtz. Teniendo en cuenta la pluralidad de sus inquietudes, relacionadas con la fisiología, no es sorprendente que Helmholtz se interesase por los intercambios de calor en la química; al fin y al cabo, uno de los puntos que trató en su memoria de 1847 sobre la conservación de la energía fue el de las

transformaciones energéticas que se producen en las reacciones químicas que dan lugar a electricidad en una pila de Volta. El resultado más interesante al que llegó Helmholtz, en 1882, para el tema que nos ocupa ahora fue la necesidad de distinguir entre la parte de la energía que aparece sólo como calor y la parte que se puede convertir en otros tipos de trabajo; esto es, una energía libre que sería, en cierto sentido, equivalente a la energía potencial en mecánica. La condición para la estabilidad química no estaba, argumentó, determinada por la producción de calor, sino por la disminución de la energía libre, F ; esto es: $\Delta F \geq 0$.

Basándose en el trabajo, entre otros, de Helmholtz, Van't Hoff publicó en 1884 un libro que figura entre los textos fundacionales de la cinética química al igual que de la termodinámica química: *Études de dynamique chimique (Estudios sobre la dinámica química)*.

De hecho, Van't Hoff es considerado uno de los tres padres de la químico- física (un término este, por cierto, que ya se utilizaba en la década de 1860: en 1863, Hermann Kopp recibió la primera cátedra universitaria de Químico- Física, en Heidelberg). Los otros dos son Svante Arrhenius (1859-1927), profesor en Estocolmo, y Wilhelm Ostwald (1853-1932), de Leipzig. En 1887, con Van't Hoff de coeditor, Ostwald fundó la revista *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, con lo que la química-física llegó, por así decir, a su mayoría de edad (otro momento importante para la nueva disciplina fue 1898, cuando Ostwald se convirtió en director de un Instituto de Químico-Física en la Universidad de Leipzig). Por la importancia que estos tres químico-físicos daban a la electroquímica, se les denomina con frecuencia creadores de la escuela de «ionistas», que debe mucho a la tesis doctoral (1884) de Arrhenius, en la que estudiaba la teoría electrolítica de la disociación.

A pesar de apoyar las ideas de Arrhenius sobre la ionización, Ostwald se opuso al atomismo y a la teoría cinético-molecular (de la que trataremos en el capítulo siguiente). No fue hasta 1909, después de los trabajos de Jean Perrin y de Théodor Svedberg, cuando Ostwald aceptó que existía una buena base experimental para adjudicar realidad física a átomos y moléculas.

Una de las cuestiones por las que se interesó Ostwald fue la de la combinación directa de nitrógeno e hidrógeno para formar amoníaco. El 12 de marzo de 1900, Ostwald escribía a la dirección de BASF (la, recordemos, Badische Anilin-und Soda-Fabrik), que había «descubierto un método para combinar nitrógeno libre (esto es, tomado del aire) con gas de hidrógeno para producir amoníaco. El material y costes son tan bajos que el precio del amoníaco sintético sería una pequeña fracción del precio presente del nitrógeno del que se puede disponer ahora». Y añadía: «El método ha sido probado en el laboratorio [...]. No necesito explicar lo que esta síntesis representa para la agricultura [...]. Además, es fácil obtener ácido nítrico a partir del amoníaco utilizando oxígeno atmosférico. Estaría encantado de recibir cualquier sugerencia en caso de que deseen contactar con nosotros acerca de las condiciones técnicas y las estimaciones económicas del descubrimiento».

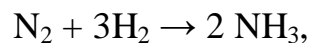
El mismo año, Ostwald solicitó una patente para producir amoníaco y compuestos amoniacados a partir del nitrógeno e hidrógeno atmosféricos, que contenía los detalles esenciales de la síntesis en gran escala que se llevaría a cabo más adelante: temperatura elevada, presión alta, un catalizador (para el hierro o cobre) y recirculación de los gases. En su autobiografía (publicada 1926), Ostwald señaló:

Como el experto reconoce inmediatamente, las ideas básicas sobre la síntesis del amoníaco, que ha llegado a ser tan importante, fueron presentadas claramente y sin ambigüedad entonces [marzo de 1900]. Por consiguiente, tengo derecho a considerarme el padre intelectual de esta industria. Ciertamente, no he llegado a ser su padre real, ya que todo el difícil y variado trabajo necesario para crear una industria técnica y económicamente viable a partir de las ideas correctas fue llevado a cabo por otros que se ocuparon del niño abandonado.

El motivo por el que Ostwald abandonó a ese «niño» que tanto prometía resultó ser que cuando, después de registrar su patente, negoció con BASF, ésta encontró, al repetir sus experimentos, que las pequeñas cantidades que se formaban de nitrógeno procedían del nitrógeno presente en todo el hierro del que se disponía

comercialmente, y que había intervenido en la prueba. Una vez que confirmó en su propio laboratorio estos resultados, Ostwald renunció a su solicitud de patente y a los contratos que ya había firmado, abandonando también esta investigación, a la que, sin embargo, había contribuido.

Fue Fritz Haber (1868-1934), otro de los grandes químico-físicos, quien logró lo que Ostwald creyó haber conseguido. Ahora bien, para ello se benefició de los trabajos de otros científicos germanos, por ejemplo, los estudios que realizó sobre los principios termodinámicos el último de los grandes químico-físicos que mencionaremos, Walther Nernst (1864-1941), que había sido discípulo de Ostwald en Leipzig. Especialmente importante para Haber fue el teorema, o tercera ley de la termodinámica, que Nernst presentó en 1905 y que suministraba los medios para calcular los valores de calores específicos. Con ello se podía predecir la probabilidad de una reacción química, viendo si los valores de la entropía y de los calores específicos tendían a cero a muy bajas temperaturas. Con este instrumento, Haber pudo estudiar la reacción



que al final le permitió fijar el nitrógeno del aire.

La culminación de los trabajos de Haber, entonces profesor de Electroquímica en Karlsruhe, llegó en 1908, y a ello contribuyó Robert Le Rossignol, un inglés que había trabajado con William Ramsey en el estudio del amoníaco antes de instalarse en la citada capital. Fue entonces cuando logró sintetizar amoníaco, utilizando osmio y uranio como catalizadores, y empleando presiones muy altas y temperaturas moderadas. El 2 de julio de 1909 realizó una demostración del proceso ante Carl Bosch (1874-1940) y Alwin Mittasch, de la BASF, en la que se obtuvieron unos cientos de gramos de amoníaco líquido. Cuatro años más tarde, y después de que Haber hubiese vendido el método a la compañía, Bosch lograba superar todos los obstáculos que existían en el proceso inicial, o que fueron apareciendo, para convertir un procedimiento que era esencialmente académico en

uno con el que se pudiese producir amoniaco en cantidades industriales (en el verano de 1913 se puso en marcha una fábrica en Oppau, que al principio obtuvo una producción diaria de 30 toneladas de amoniaco). Este proceso, denominado de Haber- Bosch, tenía lugar a una presión de 200 atmósferas y utilizaba como materias primas aire y agua. La aportación de Bosch no debe ser minimizada, como con frecuencia se hace al considerar que, en las relaciones entre ciencia y tecnología, tiene prioridad la primera frente a la segunda. Sin sus contribuciones, el proceso no habría podido llegar al estadio industrial.

La disponibilidad de un proceso de síntesis del amoniaco al comienzo de la Primera Guerra Mundial permitió a Alemania resolver el más que serio problema (sobre todo para su agricultura) que supuso la interrupción, en 1914, de su acceso a las fuentes de abonos nitrogenados naturales procedentes de América. El año anterior, Alemania —cuya población había pasado de 25 millones en 1800 a 55 en 1900— consumía 200.000 toneladas de nitrógeno al año, de las que 110.000 eran importadas en forma de nitrato procedente de Chile, sobre todo, aunque también de Perú y Bolivia (la mayor parte de esa cantidad se empleaba en la agricultura para cosechas intensivas). Entre mayo de 1921 y abril de 1922, con una extensión geográfica menor que en 1913, utilizó 290.000 toneladas, y toda esa cantidad fue producida dentro de su territorio, gracias a las habilidades de químico-físicos como Haber.

Como vemos, la químico-física constituyó una notable ampliación de la química tradicional, basada en una asociación con la física. Esta alianza se extendería más tarde con la disponibilidad de la física cuántica, especialmente en lo que se refiere a una cuestión crucial para la química: el enlace. Pero de lo que la física cuántica aportó en este punto trataremos en otro capítulo.

Capítulo 9

Dominar a Prometeo. El calor

Contenido:

- §1. *El calor como magnitud*
- §2. *Calor, cambios de fase y máquinas de vapor*
- §3. *La termodinámica: el principio de conservación de la energía*
- §4. *El segundo principio de la termodinámica y la entropía*
- §5. *La física estadística*
- §6. *El tercer principio de la termodinámica*

§1. El calor como magnitud

El calor es la forma de energía que, por su omnipresencia en el Universo, antes se hizo manifiesta a los humanos. De hecho, sin intercambios de eso que de una forma tan imprecisa como inconfundible llamamos «calor», el cosmos sería un frío y estático «receptáculo de nada», al menos de nada que se moviese, que tuviese una gota de energía. Un Universo de ese tipo únicamente poseería espacio, no tiempo, porque no podemos definir el tiempo sin cambios de espacio, y cualquier cambio involucra variación, intercambio, de energía, de calor.

La utilización del fuego —una fuente de calor— para guisar, calentar el agua y fundir los minerales está unida a la historia más temprana de la humanidad. Su dominio constituyó un elemento central para que los *Homo sapiens* se distinguieran —y se impusieran— a otras especies animales. Y para utilizar el fuego no necesitaron de más conocimientos que los imprescindibles para producir y mantener la llama.

Ahora bien, saber utilizar algo no implica que nos baste con ello, que no nos preguntemos el porqué: por qué, por ejemplo, la combustión produce calor, y qué es la propia combustión. Al menos en parte, la ciencia surgió del deseo de responder a preguntas como éstas. Y cuál es la naturaleza del calor fue una de las preguntas que se hicieron los filósofos que en la antigua Grecia crearon la ciencia.

Aristóteles (*Física*), por ejemplo, hablaba de «lo caliente en potencia» y de «lo caliente en acto», ligando, asimismo, lo caliente y lo frío a «movimientos según los cuales se dice que las sustancias son generadas y destruidas». Sin embargo, no es inmediato entender qué es lo que quería decir Aristóteles: ¿que el calor es una cualidad primaria? En cualquier caso, lo importante es darse cuenta del temprano interés por entender qué es el calor. De hecho, las dos posibilidades que acabamos de apuntar sirven bien para señalar las dos teorías que se defendieron durante mucho tiempo acerca de la naturaleza del calor. Una, denominada a veces «sustancialista», que le adjudicaba una naturaleza corporal, fue defendida, entre otros, por Pierre Gassendi (siglo XVII), que afirmó la existencia de átomos de calor, a cuya presencia y forma se debía el calentamiento de los cuerpos. La segunda teoría, dinámica, mantenía que el calor resultaba del movimiento de partículas muy sutiles que formaban parte de los cuerpos. Se trataba de una forma de teoría cinética y entre sus defensores se encontraron hombres como Francis Bacon, Robert Boyle, Robert Hooke, Isaac Newton (aunque éste no siempre mantuvo la misma opinión) y, sobre todo, Daniel Bernoulli, que elaboró, en el siglo XVIII, la primera teoría cinética de los gases.

Para avanzar realmente en el estudio del calor fue necesario dejar de tratarlo como una propiedad y que pasase a ser una magnitud, algo que se logró cuando se dispuso de instrumentos para medir los grados, la intensidad de calor.

La historia de la termometría es extensa. En la *Pneumática* de Herón de Alejandría (siglo I a. C.) se mencionan instrumentos desprovistos de escala que se utilizaban para demostrar la dilatación de un gas en el interior de un bulbo de vidrio cuando éste era calentado. Más de un milenio y medio después, en 1597, Galileo diseñó un aparato que consistía en un bulbo lleno de aire, prolongado en un tubo fino, cuyo extremo abierto era introducido en un recipiente con agua. Cuando aumentaba la temperatura, el aire del bulbo se dilataba, haciendo que el nivel del agua del tubo ascendiese. Aunque existía el problema de que ese aumento de nivel dependía también de la presión atmosférica, está claro que el instrumento de Galileo era un tipo de termómetro.

De diseño parecido al de Galileo, el termoscopio fue fabricado en 1612 por un contemporáneo y conocido suyo, Santorio Santorio (1561-1636), profesor de Medicina en Padua: incluía una escala que tenía como puntos extremos la temperatura de la nieve y la de la llama de una vela. Como médico que era, el interés de Santorio tenía que ver con la temperatura del organismo humano (la relación entre el grado de calor de un cuerpo y su salud era conocida de antiguo; por ejemplo, por Galeno en el siglo II).

Los primeros termómetros que utilizaron líquidos en lugar de un gas se construyeron hacia 1641: consistían de un bulbo lleno de agua o alcohol diluido coloreados, con el que se comunicaba un tubo de vidrio fino con muescas, sellado en el extremo para evitar la influencia de la presión atmosférica. Christiaan Huygens, por ejemplo, eligió como punto de referencia el grado de calor del agua en ebullición, mientras que Newton describió una escala termométrica dividida en 12 grados, correspondiendo el punto inferior a la congelación del agua y el superior al grado de calor de una persona sana.

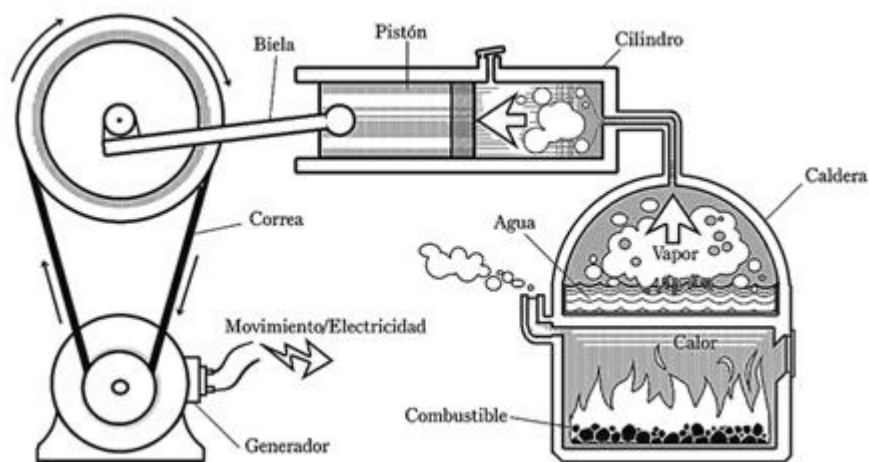
Pero los termómetros que terminaron por imponerse corresponden a principios del siglo XVIII: el del alemán Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736), el de René-Antoine de Réaumur y el del físico y astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744). Fahrenheit utilizó primero un termómetro de alcohol, que en 1714 sustituyó por uno que utilizaba mercurio, en el que introdujo su luego famosa «escala de grados Fahrenheit», que se determinó considerando las propiedades de dilatación del mercurio y tomando cuatro puntos fijos: la temperatura del invierno, particularmente frío, de 1709, que imitó utilizando una mezcla de hielo, sal común y cloruro amónico; la del hielo fundente; la del cuerpo humano; y la de la ebullición del agua. Por su parte, Réaumur empleó alcohol y tomó como puntos fijos el de la congelación del agua y el que correspondía a la temperatura que podía soportar su termómetro sumergido en agua hirviendo sin que llegase a hervir él mismo. La novedad que introdujo en 1742 Celsius fue tomar como puntos de referencia en un termómetro de mercurio la temperatura de congelación y de ebullición del agua. A la primera le asignó el valor 100 y a la segunda el 0; esto es,

la temperatura más elevada correspondía a la situación de menos calor y la más baja a la de más calor. Fue un compatriota suyo, Linneo, quien dos años después invirtió esta escala, quedando tal y como la utilizamos aún. Se trata, por supuesto, de la escala de grados centígrados, o Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

§2. Calor, cambios de fase y máquinas de vapor

El calor es responsable de un efecto particularmente importante: el cambio de fase, relacionado con los tres estados en los que se puede presentar la materia: sólido, líquido y gaseoso. En el caso del agua, los cambios de fase se distinguen por un nombre específico: «agua» para el estado líquido, «hielo» para el sólido y «vapor» para el gaseoso.

El calor de la combustión produce vapor de agua, pero durante milenios ese calor se perdió en el aire atmosférico sin producir ninguna utilidad, y ello a pesar de que se inventasen aparatos relacionados con este fenómeno. Aparatos como la bola de Eolo o eolípila (descrito por el citado Herón de Alejandría), que consistía en una bola hueca de metal en la que se introducía el vapor procedente de un recipiente en el que hervía el agua; la salida del vapor, a través de unos tubos acodados, producía por reacción el giro de la bola (esto es, lo que nosotros denominaríamos «un trabajo»).



Máquina de vapor

Fue, sin embargo, Denis Papin (1647-1712?) quien avanzó en el camino de aprovechar el vapor de agua producido en una combustión para generar trabajo de manera más eficiente. En 1690, publicó en la revista *Acta eruditorum* de Leipzig un artículo con un título comercial, «Nuevo método para obtener fuerzas considerables a bajo precio», que contenía lo esencial para construir una máquina de vapor. Según su descripción, estaba constituida por un tubo cilíndrico cerrado por un extremo, mientras que en el otro se disponía un émbolo móvil provisto de un vástago perpendicular en la cara exterior. Tras verter una pequeña cantidad de agua en el fondo del cilindro, lo tapaba con la pieza móvil y aplicaba fuego al extremo en contacto con el agua. El cambio de fase convertía el agua en vapor, que al aumentar su volumen empujaba el pistón hacia el exterior, un movimiento mecánico que podía ser utilizado directamente para transmitir la presión o para convertirlo, mediante un cigüeñal, en un movimiento circular. Al retirar o apagar el fuego, se producía la condensación y el vacío. La presión atmosférica devolvía el pistón a su posición original, tras haber producido una pequeña cantidad de trabajo. No fue este el primer diseño de máquina basada en el vapor, pero sí la primera que incluía piezas móviles y la posibilidad de convertir el movimiento lineal del embolo en circular, lo que permitía construir máquinas para otras funciones que no fuesen la extracción del agua de las minas. Aun así, el rendimiento de la máquina de Papin era muy bajo y, aunque se esforzó en mejorarlo, no tuvo éxito.

Un avance sustancial en las máquinas de vapor fue el introducido por el mecánico inglés Thomas Savery (1650?-1715), que en 1698 patentó un artefacto que utilizaba la presión atmosférica para hacer subir el agua del fondo de un recipiente —en el que previamente se había hecho el vacío— mediante la condensación del vapor, sin utilizar más piezas móviles que unas válvulas. Más tarde, Thomas Newcomen (1663-1729) construyó una máquina formada por un gran cilindro vertical, abierto en su parte superior, en el que un pistón se movía de arriba hacia abajo. El movimiento lo originaba el vapor (producido por un líquido en ebullición) que se introducía en el cilindro por debajo del pistón y que se condensaba después

inyectando agua fría. Como consecuencia se producía un vacío parcial, contra el que actuaba la presión atmosférica que hacía bajar al pistón. Una nueva inyección de vapor volvía a elevarlo, repitiéndose entonces el proceso. Se producía así un movimiento vertical que podía utilizarse conectando al otro extremo un elemento adecuado de otra máquina (normalmente una bomba para extraer agua de las minas). Por último, James Watt (1736-1819) introdujo un condensador separado del cilindro, refrigerado por agua, para evitar la necesidad de inyectar agua condensada en el cilindro. Utilizó, asimismo, vapor, en lugar de la atmósfera, para hacer bajar el pistón, e incorporó unas ruedas para comunicar el movimiento lineal del émbolo en todo tipo de movimientos circulares compuestos.

La conversión del calor del fuego en movimiento proporcionaba una fuente aparentemente inagotable de energía, sin las limitaciones de los ingenios mecánicos que utilizaban la originada por el viento y la corriente de los ríos, y era natural que no sólo se intentase construir, mediante sagaces innovaciones técnicas, mejores máquinas, sino también comprender los principios que subyacían en los procesos físicos implicados, procesos que pusieron en marcha una gran transformación social, la Revolución Industrial. Tal tarea sería el objeto de una nueva rama de la física: la termodinámica.

§3. La termodinámica: el principio de conservación de la energía

Fue esa tarea la que acometió un joven francés que estudió en la prestigiosa y selecta École Polytechnique de París: Sadi Carnot (1796-1832). Consciente de las consecuencias económicas y políticas de la industrialización, en 1819 Carnot se planteó el problema de optimizar el rendimiento de las máquinas de vapor. Presentó sus ideas en una pequeña memoria publicada en 1824 y titulada *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres á développer cette puissance* (*Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*). El planteamiento de Carnot —y ahí reside la gran novedad que introdujo frente a las aportaciones tecnológicas precedentes— era de carácter general, «independiente de todo mecanismo, de todo agente particular»,

aplicable a «cualquier máquina de fuego imaginable», aunque en realidad él tomó como modelo para su máquina térmica un salto de agua, algo consistente con su asunción de la teoría, sustancialista, de que el calor (calórico) era un tipo de sustancia material.

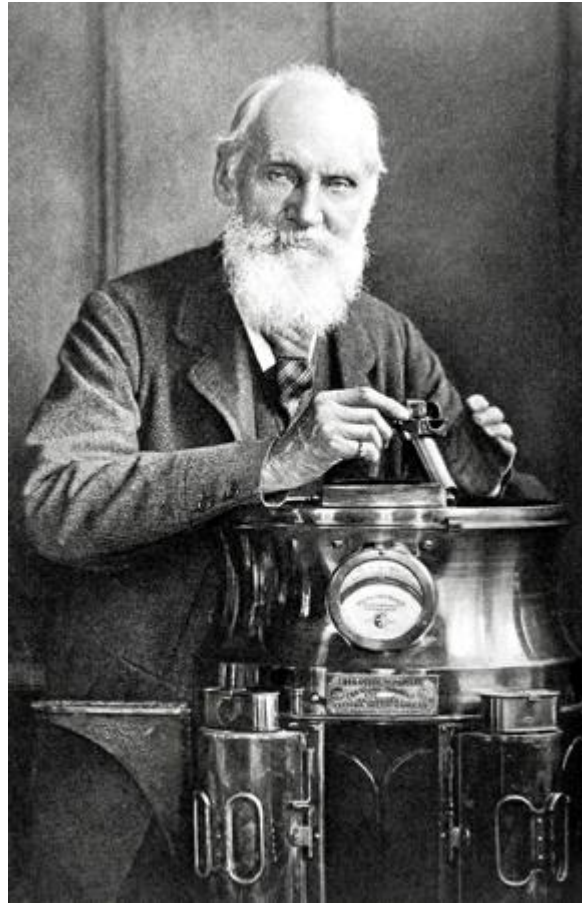
En particular, Carnot concibió la «potencia motriz», una novedad semántica conocida más adelante como «trabajo», no como el consumo del calor, sino como la comunicación de éste del cuerpo más caliente al que lo estaba menos: «La producción de la potencia motriz en la máquina de vapor se debe no a un consumo real del calórico, sino a su transporte de un cuerpo caliente a un cuerpo frío». Según este principio, «para producir potencia motriz, no basta con producir calor: además hay que procurarse frío». «Allí donde existe una diferencia de temperatura», proponía como uno de sus enunciados más generales, «puede haber producción de potencia motriz».

Un punto importante para entender la memoria de Carnot es que su máquina de vapor requería de un proceso reversible, algo irrealizable en la práctica. Era necesario introducir la noción de irreversibilidad, que conduciría al concepto de entropía con el que se formularía el denominado «segundo principio de la termodinámica», que tuvo de esta manera en los enunciados de Carnot a uno de sus predecesores.

No obstante la originalidad y fecundidad implícita en las ideas de Carnot, éstas no encontraron apenas eco. En 1834, otro antiguo alumno de la *École Polytechnique*, Benoit-Pierre-Émile Clapeyron, profesor en la Escuela de Caminos y Puertos de París, resucitó el trabajo de Carnot en un artículo que publicó en el *Journal de l'École Polytechnique*, en el que le daba una forma más matemática utilizando un gráfico, donde las abscisas representaban los volúmenes y las ordenadas las presiones, para expresar el proceso cíclico en el que se había basado Carnot. Pero el artículo de Clapeyron tampoco atrajo mucha atención, hasta que en 1845 lo descubrió William Thomson (el futuro lord Kelvin). Entre tanto, la atención de los científicos se centró sobre todo en la producción de calor a partir del movimiento (y el trabajo) mecánico y de otras fuentes (electricidad, química, fisiología): a lo largo

de la primera mitad del siglo XIX se llevaron a cabo una serie de experimentos que sugirieron o demostraron a algunos científicos que existía una correlación entre diferentes fuerzas y que, de alguna manera, se podían intercambiar sin que disminuyese el montante total de la fuerza total inicial. La existencia de esa correlación, o interconexión, entre diferentes fuerzas venía sugerida por diferentes hechos; por ejemplo, que al pasar una corriente eléctrica por un cable éste se calentase, que la pila de Volta fuese capaz de producir electricidad basándose como se basaba en reacciones químicas, la interrelación descubierta por Oersted (1820) y Faraday (1821, 1831) entre electricidad y magnetismo, o la producción de calor en reacciones químicas y en movimientos musculares. Investigaciones como éstas condujeron a la formulación del denominado «primer principio de la termodinámica», el de la «conservación de la energía», al que hemos hecho mención anteriormente.

Desde el punto de vista cronológico, el primer científico al que debemos referirnos es al médico alemán Julius Robert Mayer (1814-1878).



Lord Kelvin (William Thomson)

Durante un viaje a Java realizado en 1840, como médico, en un barco holandés, Mayer practicó una sangría (aún se pensaba que las sangrías constituían un procedimiento médico eficaz, que, por ejemplo, ayudaba a soportar el calor) en una vena de un marino que tenía fiebre. Observó que la sangre venosa del enfermo era más clara de lo normal, pareciéndose a la arterial. Asoció entonces esta observación con una teoría que había enunciado Lavoisier: que los animales de sangre caliente mantenían su temperatura gracias a la combustión lenta de los alimentos mediante oxígeno dentro del cuerpo, e interpretó que lo que había visto era debido a que la sangre venosa circulaba transportando mucho más oxígeno de lo normal, ya que el calor de los trópicos hacía que el cuerpo tuviese que quemar menos combustible, consumiendo, en consecuencia, menos oxígeno. Su conclusión fue que el calor, ya proviniese del esfuerzo muscular, del calor del Sol o de cualquier otra fuente, y la

energía eran intercambiables. En 1842, el año siguiente de su regreso a Alemania, Mayer publicó en la revista *Annalen der Chimie und Pharmacies* (dirigida por Liebig) un breve artículo («Las fuerzas de la naturaleza inorgánica») en el que analizaba una serie de experimentos de los que se podía deducir «la metamorfosis de las fuerzas fundamentales» de la naturaleza: caída libre de los cuerpos, movimiento, calor, magnetismo, electricidad y transformaciones químicas. «Fuerzas son causas», leemos en su artículo. También: «la propiedad de todas las causas es su *indestructibilidad*», «las fuerzas son objetos *indestructibles, convertibles e imponderables*» y «una vez que existe, una fuerza no puede ser aniquilada, sólo puede cambiar de forma».

Otro de los grandes nombres vinculados con la formulación del principio de la conservación de la energía es el de un inglés, hijo del rico propietario de una fábrica de cerveza de Manchester, James Prescott Joule (1818-1889). Utilizando una de las habitaciones de su casa familiar, que reconvirtió en laboratorio, Joule se dedicó a estudiar las transformaciones de diferentes fuerzas, en particular la del trabajo mecánico en calor. Su contribución más importante y conocida fue la demostración de que el trabajo se convierte en calor: para ello agitó el agua de un contenedor mediante una rueda con paletas, midiendo luego el aumento de temperatura del líquido (no fue éste, sin embargo, el único experimento que llevó a cabo). Dio a conocer sus resultados en su artículo «Sobre la existencia de una relación equivalente entre el calor y las formas ordinarias de poder mecánico», que apareció en 1845 en *Philosophical Magazine*. Enunció el «equivalente mecánico del calor», que calculó entonces de la manera siguiente: «parece que por cada grado [Fahrenheit] de calor producido por la fricción del agua, se ha empleado un poder [trabajo] mecánico igual al que puede hacer subir un peso de 890 libras un pie» (expresado en julios por calorías, unidades que se establecieron más tarde, el valor actual del equivalente mecánico del calor es 4,19 julios/caloría).

Ahora bien, la formulación más general, inmersa en un contexto teórico-matemático, la suministró un médico alemán, Herman von Helmholtz (1821-1894), cuyo nombre ya ha aparecido en estas páginas. Basándose en experimentos propios

(que realizó en el tiempo libre que le quedaba de sus obligaciones como médico militar), al igual que en la literatura física y biológica existente, Helmholtz produjo en 1847 una memoria, *Über die Erhaltung der Kraft* (*Sobre la conservación de la fuerza*), en la que no se limitaba al dominio biomédico, sino que consideraba también las transformaciones entre todo tipo de fenómenos, físico-químicos al igual que orgánicos, a la vez que mostraba cómo encajaba el principio de la conservación de la energía en la mecánica newtoniana. Es importante señalar que estos intereses de Helmholtz se insertan también en un movimiento de reacción contra el vitalismo (la creencia de que la vida no se podía reducir a procesos físico-químicos) que tuvo lugar a partir de comienzos del siglo XIX, especialmente entre fisiólogos como Johannes Müller, Emil du Bois-Reymond, Ernst Brücke y Carl Ludwig. Volveremos a este punto en el capítulo 18.

§4. El segundo principio de la termodinámica y la entropía

A pesar de su importancia, el principio de la conservación de la energía no arrojaba luz sobre la cuestión de la relación entre el calor-energía y la producción de trabajo. Para salvar este obstáculo había que continuar por la senda abierta por Carnot.

Este problema había atraído la atención de William Thomson (luego lord Kelvin) en 1845, pero aunque realizó algunas aportaciones no fue él quien tomó la iniciativa en la formulación definitiva de lo que sería el segundo principio de la termodinámica, sino Rudolf Clausius (1822-1888).

En un artículo que publicó en 1850, titulado «Sobre la fuerza motriz del calor, y las leyes relativas a la naturaleza del calor que se deducen de esa naturaleza», Clausius dio los pasos necesarios para introducir el segundo principio de la termodinámica, sosteniendo que para generar trabajo en una máquina se necesitaba tanto transferencia de calor como transformación de calor. Prácticamente al mismo tiempo que Clausius introducía estas ideas, en 1851 Kelvin publicaba otras similares. «El mérito», señalaba Kelvin, «de establecer en primer lugar, sobre principios correctos, la proposición “Es imposible, mediante un agente material inanimado, obtener un efecto mecánico a partir de un porción arbitraria de materia

enfriada por debajo de la temperatura de los objetos más fríos de los alrededores” se debe enteramente a Clausius, quien publicó su demostración en el mes de mayo del año pasado, en la segunda parte de su artículo sobre la potencia motriz del calor». Y continuaba: «Permítaseme añadir que yo he dado la demostración tal y como se me ocurrió antes de saber que Clausius la había enunciado. El axioma sobre el que se funda la proposición de Clausius es el siguiente: no es posible para una máquina autopropulsada transmitir calor de un cuerpo a otro con una temperatura más elevada, sin ayuda de un agente exterior».

La proposición «Es imposible, mediante un agente material inanimado, obtener un efecto mecánico a partir de un porción arbitraria de materia enfriada por debajo de la temperatura de los objetos más fríos de los alrededores» constituye una base indispensable sobre la que se asienta el segundo principio de la termodinámica, pero no lo agota. Hacía falta introducir un nuevo, y revolucionario, concepto, que representaría uno de los grandes pilares de cualquier visión del mundo: el concepto de «entropía», cuyos padres fueron Kelvin y Clausius.

La formulación canónica del concepto de entropía la dio Clausius en un artículo que publicó en 1862. Lo definió allí como dQ/T , donde dQ es el elemento de calor cedido por un cuerpo a cualquier depósito de calor durante sus modificaciones, y T la temperatura absoluta del cuerpo en el momento de ceder este calor. $\int dQ/T = 0$ debe ser cierta para todo proceso circular reversible, mientras que $\int dQ/T \geq 0$ se verifica para cualquier proceso circular que sea posible.

En 1862 Clausius aún no empleaba símbolo alguno ni término específico para $\int dQ/T$. Fue en un artículo de 1866 donde introduciría el nombre «entropía». Escribía allí: «De forma intencionada, he formado la palabra *entropía* para que sea lo más parecida posible a la palabra *energía*, puesto que las dos magnitudes que vienen dadas por estos nombres están tan estrechamente relacionadas en sus significados físicos que parecía apropiada una cierta similitud en sus nombres».

En este trabajo también se mencionaba explícitamente una de las propiedades que la entropía tenía para Clausius: que en un sistema aislado la entropía siempre aumenta. De esta manera, se podía explicar el comportamiento de tantos y tantos

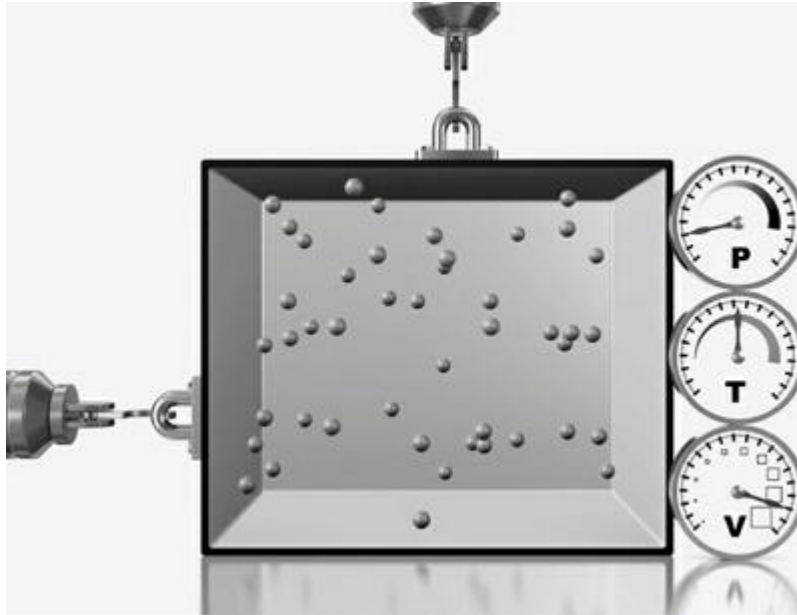
fenómenos físicos, en los que se comprueba con claridad que unos son posibles y otros no: un vaso se rompe en mil pedazos, pero mil pedazos no recomponen un vaso; el calor termina distribuyéndose de manera uniforme entre dos recipientes comunicados, uno de los cuales está inicialmente más caliente que el otro, mientras que el proceso inverso —calor que se concentra en una región de un recipiente, dejando fría otra parte— no tiene lugar. Procesos estos que la mecánica de Newton sí permite, puesto que las ecuaciones newtonianas mantienen su forma cambiando t por $-t$ (invariancia mediante inversión temporal). La entropía, en suma, es la única magnitud que apunta en una determinada dirección del tiempo, una idea que se expresa como la «flecha del tiempo». A medida que avanzamos en el tiempo la segunda ley hace que la entropía de un sistema aislado aumente o se mantenga estable.

§5. La física estadística

Hasta ahora hemos hablado del calor, pero ¿cuál es su naturaleza? Carnot, como vimos, pensaba que era una sustancia imponderable (calórico). Un nombre importante en la elucidación de la naturaleza del calor es el de un norteamericano, que finalmente se asentó en Europa, Benjamín Thomson, conde Rumford (1753-1814). A finales de la década de 1770, cuando vivía en Inglaterra, Rumford realizó experimentos con cañones que le hicieron dudar de que el calórico fuese una sustancia que podía pasar de un cuerpo a otro. No fue, sin embargo, hasta veinte años más tarde cuando llevó a cabo experimentos más concluyentes. Construyó un cilindro de bronce que pudiera ajustarse a un taladro de acero, al que se hacía girar mediante una máquina taladradora impulsada por caballos. A continuación situaba cilindro y taladro dentro de una caja de madera llena de agua a una temperatura de 18 °C y cerrada herméticamente. Entonces ponía en funcionamiento el taladro, cuya broca (que giraba 32 vueltas por minuto) comenzaba a horadar el cilindro. Al poco tiempo, Rumford observó que el cilindro y el agua se calentaban. «Al cabo de una hora encontré», señaló en el artículo que publicó en 1798 detallando sus resultados, «introduciendo un termómetro en el agua, que su temperatura había aumentado no

menos de 9 °C y al cabo de dos horas y veinte minutos era de 94 °C, y a las dos horas y media ¡el agua hervía!».

Tras repetir el experimento una y otra vez (vaciando el agua caliente y sustituyéndola por agua fría), llegó a la conclusión de que, al menos aparentemente, el calor generado mediante la fricción entre broca y cilindro (o, extrapolando, entre cualquier pareja de cuerpos) era inagotable. Pero si era así, entonces resultaba difícil pensar que el calor/calórico era una sustancia. En su lugar, él pensó que el calor no era otra cosa que movimiento: «Me parece extremadamente difícil, si no imposible», escribió, «hacerme una idea clara de alguna cosa que pueda ser provocada y transmitida del modo en que el Calor es provocado y transmitido en estos experimentos, salvo que esa cosa sea el movimiento». Es imposible no recordar estas ideas de Rumford cuando se lee el título de uno de los artículos fundadores de la teoría cinética del calor, el que publicó en 1857 Clausius: «La naturaleza del movimiento que llamamos calor».



Moléculas en movimiento (teoría cinética de los gases)

Tal y como se desarrollaron inicialmente, los dos principios de la termodinámica no dependen de lo que sea el calor, de su naturaleza. En este sentido, la termodinámica

es una teoría fenomenológica o de principios, que no depende de modelos. Esta situación terminaría cambiando, especialmente en lo que se refiere al segundo principio, con la introducción de la teoría cinética de los gases y, en general, de la física estadística.

La idea de que el calor no es sino la manifestación del movimiento de las unidades indivisibles e invisibles que componen los cuerpos posee una larga historia, la historia del atomismo y de la filosofía mecanicista, una filosofía que se ajusta muy bien a la nueva mecánica introducida por Newton en los *Principia*; sin embargo, fue el estudio de los gases el área de la física que más hizo evolucionar esa línea de pensamiento. Se llegó así a desarrollar durante la segunda mitad del siglo XIX la teoría cinética de los gases, cuyos postulados básicos son los siguientes:

- El volumen que ocupan las partículas es insignificante comparado con el del recipiente.
- Todas las partículas de un gas son idénticas.
- Las moléculas se mueven a gran velocidad y en línea recta.
- Las colisiones son elásticas.
- La temperatura es la medida de la energía de las partículas.
- La presión del gas se debe a la colisión de las partículas.
- De alcanzar el cero absoluto de temperatura cesaría el movimiento.

Es importante señalar que la teoría cinética de los gases se construyó a partir de la concepción de «gas ideal», definido como aquel en el que las colisiones entre átomos o moléculas (no hay ningún otro tipo de interacción entre estas unidades) son perfectamente elásticas: recuperan su forma anterior después del choque.

De base atomística es también la física(o, simplemente, mecánica) estadística, una rama de la física que surgió, durante el siglo XIX, de la teoría cinética de los gases para, fundamentalmente, suministrar una interpretación microscópica, molecular o atómica, de las leyes de la termodinámica. Objetivos preferentes de la física estadística incluyen:

1. encontrar expresiones para magnitudes macroscópicas tales como presión, temperatura, energía interna o entropía en términos de propiedades microscópicas, del tipo de la masa, la velocidad molecular y la energía potencial;
2. deducir ecuaciones de estado, que relacionan entre sí las variables que caracterizan a un sistema, para materiales específicos; y
3. determinar magnitudes termodinámicas que se miden experimentalmente en función de constantes microscópicas fundamentales.

Como apuntamos, fue Clausius —recuérdese su artículo de 1857, «La naturaleza del movimiento que llamamos calor»— uno de los grandes responsables de que la física estadística se convirtiese en una disciplina plenamente estructurada y consolidada. En un segundo trabajo de 1858 («Sobre el recorrido medio de las trayectorias descritas por las moléculas que forman cuerpos gaseosos»), Clausius introdujo un concepto completamente nuevo y extremadamente original, el «recorrido medio» de la molécula de un gas, que abrió el camino a la determinación estadística de movimientos de gran número de cuerpos que colisionan entre sí. Y sobre esa base construyó otro de los grandes físicos del XIX: James Clerk Maxwell (1831-1879).

Clausius había basado su trabajo en la suposición de que todas las moléculas del gas tenían la misma velocidad, pero era evidente que esto no podía ser cierto. Una de las aportaciones más importantes de Maxwell fue (1860) la obtención de una fórmula estadística para la distribución de velocidades en un gas a presión uniforme: su famosa «función de distribución», con la que de hecho comenzó una nueva era de la física.

Ayudado por el tipo de análisis introducido por Clausius y Maxwell, en 1865 Josef Loschmidt (1821-1895) realizó la primera estimación del diámetro de una molécula, adelantándose al irlandés George Stoney (1826-1911) y a Kelvin, quienes hicieron otro tanto de manera independiente en, respectivamente, 1868 y 1870. Con las medidas de Loschmidt fue posible dar una estimación —aunque aún

fuese imprecisa— del número de moléculas presentes en un volumen dado, un paso decisivo en la determinación del denominado «número de Avogadro», cuestión a la que ya nos hemos referido y a la que volveremos más adelante, en este mismo capítulo.

Otro de los grandes nombres de la física estadística es el del austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1904), una de cuyas aportaciones fue generalizar, a partir de 1868, los resultados de Maxwell, adaptándolos para el caso de gases complejos en presencia de un campo de fuerzas externo (como el gravitacional). De ahí que se hable de «función de distribución de Maxwell- Boltzmann». Otra gran contribución de Boltzmann a la física estadística, una más celebrada y conocida que la anterior, es la interpretación estadística de la segunda ley de la termodinámica, que presentó en un artículo publicado en 1877. Se trata de la célebre expresión para la entropía de un sistema,

$$S = k \times \ln W$$

donde k es una constante (introducida precisamente por Planck posteriormente y denominada «constante de Boltzmann») y $\ln W$ es el logaritmo neperiano del número de posibles configuraciones moleculares («microestados» en la terminología actual). En palabras del propio Boltzmann cuando introdujo esta formulación:

El estado inicial de un sistema será, en la mayoría de los casos, un estado muy poco probable y el sistema tenderá siempre hacia estados más probables, hasta llegar al estado más probable, es decir, al estado de equilibrio termodinámico. Si aplicamos esto al segundo principio de la termodinámica, podemos identificar la magnitud que se acostumbra a llamar entropía, con la probabilidad del estado correspondiente. Consideremos por tanto un sistema de cuerpos que esté aislado [y cuyo estado no se modifica más que por la interacción entre los cuerpos que lo constituyen]. En una transformación de este tipo, la entropía total del sistema no puede más que

aumentar en virtud del segundo principio de la termodinámica. En nuestra interpretación actual esto no significa otra cosa que el hecho de que la probabilidad del estado del conjunto de los cuerpos del sistema debe ir aumentando constantemente: el sistema no puede pasar más que de un estado a un estado más probable.

La formulación que dio Boltzmann para el segundo principio de la termodinámica introdujo un elemento completamente nuevo en las leyes de la naturaleza. Frente a la estricta causalidad que imperaba en la física newtoniana, la segunda ley de la termodinámica a la manera de Boltzmann abría la puerta a la posibilidad, aunque muy pequeña, de procesos que se desarrollaban de forma contraria a las expectativas nacidas de las experiencias cotidianas y, aparentemente al menos, universales: la entropía podía disminuir.

No es sorprendente, por supuesto, que la propuesta de Boltzmann fuese combatida con firmeza por muchos físicos, para los que los átomos eran meros «artificios explicativos» carentes de realidad. La reivindicación del atomismo vino de la mano del desarrollo de la propia física estadística, estableciéndose definitivamente gracias a dos resultados. El primero fue el descubrimiento, en 1897, del electrón, la primera partícula universal identificada, y se debió al físico inglés Joseph J. Thomson. El segundo se debió a un físico entonces desconocido en el mundo académico, uno que trabajaba en la Oficina de Patentes de Berna, Albert Einstein, del que volveremos a hablar en otro capítulo. En 1905, Einstein publicó un artículo titulado «Sobre el movimiento requerido por la teoría cinético-molecular del calor para partículas pequeñas suspendidas en fluidos estacionarios», que contenía un análisis teórico de un efecto observado en 1827 por el botánico escocés Robert Brown (1773-1858). Lo que Brown constató fue que partículas de polen suspendidas en un líquido en reposo, y que únicamente eran visibles mediante un microscopio, experimentaban movimientos erráticos repentinos. Einstein explicó este «movimiento browniano» no mediante argumentos biológicos, sino mecánicos, utilizando la física estadística y suponiendo que el líquido no era un medio

continuo, sino que estaba compuesto por moléculas o átomos que se movían continuamente. Apoyaba de esta manera la atomicidad.

Además de la interpretación teórica realizada por Einstein, incluyó otro resultado de gran importancia, la determinación del valor del número de moléculas que contiene un mol, un concepto este que se define como la cantidad de una sustancia que contiene tantas entidades elementales del tipo que se considere (átomos, moléculas, etc.) como átomos hay en 12 gramos de carbono-12 (así, un mol de agua son 18 g y un mol de monóxido de carbono, 28 g). Se trata de lo que se conoce como «número de Avogadro», si bien no fue Einstein quien introdujo este nombre que relacionaba estos resultados con los trabajos de Amedeo Avogadro, sino el físico francés Jean Perrin (1870-1942).

Con la ayuda en los cálculos matemáticos de Paul Langevin (1872-1946), y observando sus movimientos, Perrin estimó la energía media de gránulos vegetales de látex, obteniendo un valor aproximadamente 100.000 veces menor que el que se derivaba de la teoría cinética. El problema procedía, seguramente, de sus observaciones de los movimientos, pero ¿cómo mejorarlas? Afortunadamente, el nuevo ultramicroscopio inventado en 1903 por Henry Siedentopf (1872-1940) y Richard Zsigmondy (1865-1929), que permitía realizar observaciones de hasta 5×10^{-3} micras, vino en su ayuda. Con él, Perrin pudo determinar de manera más exacta los valores de las velocidades medias. Con relación al número de Avogadro (cuyo valor estimó en $70,5 \times 10^{22}$ por mol^{-1} ; en la actualidad el valor aceptado es de, aproximadamente, 6×10^{23} mol^{-1}), Perrin escribía:

El enunciado de Avogadro equivale por consiguiente al siguiente: Dos moléculas- gramo cualquiera contienen el mismo número de moléculas. Este nombre invariable, N, es una constante universal que parece justo denominar número de Avogadro. Si se conoce esta constante, se conocerá la masa de cualquier molécula; incluso se conocerá la masa de cualquier átomo, puesto que podemos saber, mediante los diversos medios que conducen a las fórmulas químicas, cuántos átomos de cada tipo hay en cada molécula.

§6. El tercer principio de la termodinámica

Aunque menos conocido que los dos primeros principios, existe también un tercer principio de la termodinámica. Su formulación se debe al químico- físico alemán Walther Nernst (1864-1941) y es la siguiente: «En la inmediata proximidad del cero absoluto de temperatura, el trabajo máximo que puede obtenerse en una reacción isoterma es independiente de la temperatura». Consecuencia de esto es que todos los procesos en el cero absoluto se producen sin cambios en propiedades como calores específicos o entropías; de hecho, la formulación más breve —debida a Planck en 1912— del principio de Nernst es que las entropías se anulan en el cero absoluto.

Ahora bien, inicialmente Nernst sólo pudo proponer, no demostrar, este principio. En su Instituto de Berlín, junto a colaboradores como Arnold Eucken y el británico Frederick Alexander Lindemann, futuro lord Cherwell, Nernst llevó a cabo medidas a bajas temperaturas que mostraron que los calores específicos de los cuerpos sólidos tienden a cero al disminuir la temperatura. Pero esto es precisamente lo que se deducía de resultados teóricos que Einstein había obtenido en 1907 en el contexto de la física cuántica, no en el de la física clásica. No obstante, pronto aparecieron discrepancias, desviaciones sistemáticas: los calores medidos disminuían con mucha más lentitud que la prevista según las expresiones de Einstein. Para intentar remediar la situación, en 1911 Nernst y Lindemann modificaron la fórmula de Einstein, pero de manera empírica, sin base teórica alguna, un problema que sería resuelto finalmente por el holandés Peter Josef William Debye en un artículo publicado en 1912.

Capítulo 10

Magnetismo y electricidad. El secreto del ámbar

Contenido:

§1. *Magnetismo*

§2. *Electricidad estática*

§3. *La pila eléctrica y la corriente eléctrica*

§4. *Electromagnetismo*

§5. *Electrodinámica*

§6. *La transmisión de electricidad*

§1. Magnetismo

Aunque no se trata de fenómenos físicos con los que se relacionan de manera explícita, magnetismo y electricidad figuran entre los más tempranamente identificados por los humanos. El magnetismo fue el primero del que tuvieron conciencia, y ello por una circunstancia especial: se manifiesta explícitamente en un mineral que se encuentra en la naturaleza, la magnetita, una mezcla de óxidos de hierro. Parece que el primer lugar occidental donde se halló y fue reconocida su propiedad de atraer al hierro fue en una región de Asia Menor llamada Magnesia, de donde procedería el nombre de «magnetismo», mientras el mineral, la «magnetita», se denominaba «piedra imán». En el siglo VII a. C., Tales de Mileto se refirió a ella haciendo notar que comunicaba la capacidad de atraer al hierro mediante el contacto. Diferente fue el descubrimiento de la electricidad, que era resultado de una acción natural: la que producen los rayos de las tormentas la fricción del ámbar (*electrike*), una resina fósil del *Pinus succinifera*, con piezas de lana o piel. La electricidad no existe libre en la naturaleza de la misma forma que el magnetismo: se crea y se consume en la producción de una chispa.

La aguja imanada, la primera aplicación práctica del magnetismo, tardó más en llegar. Hay constancia de que en el siglo XI un polifacético chino, Shen Kuo, se refirió al magnetismo como medio de orientarse hacia el norte. Utilizó para ello

agujas metálicas magnetizadas y recomendó su uso para la navegación de altura. A finales de la siguiente centuria ya aparecen en Europa documentos en el mismo sentido.

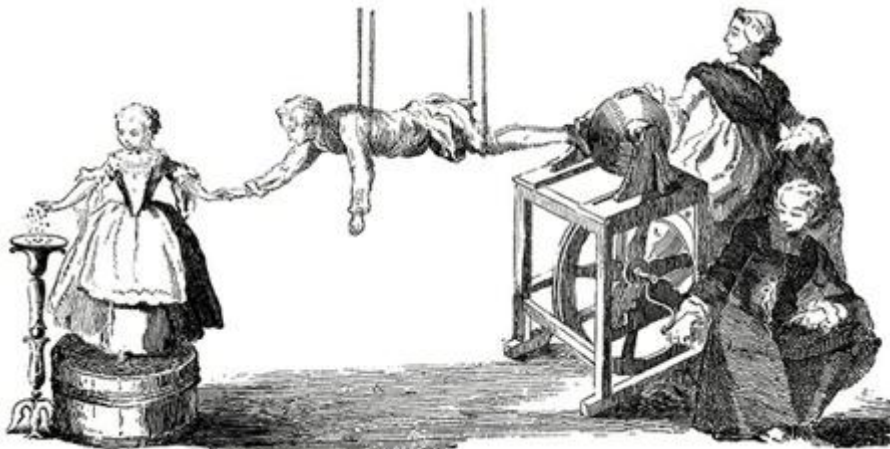
Se utilizaban agujas de hierro blando que se habían magnetizado poniéndolas en contacto con magnetita, y se las hacía flotar en un cuenco de agua, una disposición que en un barco únicamente funcionaba si el mar estaba en calma, es decir, con buen tiempo. La primera referencia a una brújula parecida a las que conocemos, esto es, una aguja que puede girar en un contenedor seco, data de 1269, y aparece en un texto del francés Pierre Pelerin de Maricour, más conocido como Petrus Peregrinus, la *Epístola de magnete*. En él, Peregrinus identificó los dos polos del imán, a los que, de acuerdo con el modelo de la esfera terrestre, denominó norte (N) y sur (S), describiendo varias formas de reconocerlos. Al buscar los límites interiores de las zonas polares de esas agujas, se encontró con la sorpresa de que cualquier fragmento era un dipolo, esto es, no era posible separar polo norte y polo sur. Asimismo, al acercar dos imanes descubrió que los polos iguales se repelían y los distintos se atraían hasta formar uno más potente, y que la atracción era proporcional a la masa. Imaginó las líneas que, procedentes de un polo se dirigían al otro, el, como se denominaría mucho más tarde, «campo magnético», en que se producía la atracción. Una aguja imanada, colgada o apoyada sobre el centro de equilibrio, se movía a lo largo del círculo al seguir el movimiento de un imán, en tanto se orientaba hacia el norte cuando no era desviada por una fuerza próxima.

Pero el gran nombre en la historia del magnetismo clásico es William Gilbert (1540-1603), un médico que en 1600 publicó un libro, *De magnete*, en el que describió los experimentos que había realizado con una pequeña esfera imanada (*terrella*) sobre la que colocaba agujas imanadas igualmente. En la primera parte de su libro ofrecía una historia del magnetismo y concluía con la concepción de la Tierra como un gigantesco imán. Distinguió, en la segunda, entre el magnetismo como propiedad de la materia y la electricidad que se generaba mediante la fricción. Imaginó que el modo de producirla se reflejaba en sus propiedades: resinosa la que se obtenía al frotar el ámbar con una piel y vítrea la que se producía

mediante la fricción del cristal con la seda. Introdujo la declinación magnética para explicar la desviación de la brújula respecto al polo geográfico.

§2. Electricidad estática

La electricidad no se muestra en la naturaleza de la misma manera que el magnetismo. Ahora sabemos que los rayos que se producen durante las tormentas no son sino descargas eléctricas, pero esto tardó en averiguarse, al ser difícil y arriesgado experimentar con este fenómeno natural. Aun así, sabemos que ya Tales observó, aproximadamente 600 años antes del inicio de la era cristiana, el ya citado efecto de que cuando se frota el ámbar éste es capaz de atraer cuerpos ligeros. De hecho, de ahí proviene la palabra «electricidad», una derivación del término griego para «electrón», que era como se denominaba en esta lengua al succino o ámbar amarillo.



Demostración de electricidad estática

El ámbar ofrece el primer ejemplo de un tipo de electricidad que dominó el estudio de este campo durante mucho tiempo: la electricidad estática, producida por frotación. Son muchas las sustancias que, al ser frotadas, por ejemplo, con un pedazo de paño o piel de gato, generan esta clase de electricidad. En 1660, Otto von Guericke construyó la primera máquina (electrostática) que producía

electricidad por frotación. En la memoria en la que anunció el resultado de su trabajo (*Experimenta nova*; 1672), explicaba que había construido una esfera de azufre fundida sobre un globo de cristal, que daba vueltas alrededor de un eje de hierro, de manera que, al colocar una mano muy seca sobre la esfera, una vez que se la hacía girar con una manivela unas cuantas veces, la esfera se electrizaba debido al rozamiento con la mano, siendo capaz de atraer objetos pequeños.

Los experimentos de Von Guericke constituyeron el comienzo de una carrera por mejorar el rendimiento de sucesivos modelos de generadores electrostáticos. La sustitución de la esfera por un disco (1800) acabó con el procedimiento de generar electricidad mediante fricción manual. La mejora en la generación de electricidad se consiguió intercalando láminas de metal entre los discos del generador sobre los que actuaban una escobillas, de forma que produjesen electricidad de manera ininterrumpida y a tensiones elevadas.

La producción de electricidad permitió toda clase de experimentos, que condujeron al descubrimiento de nuevas características y aplicaciones. Un nombre que debe ser recordado es el de Stephen Gray (1666-1736), que en uno de sus trabajos profundizó en un fenómeno que ya había observado Von Guericke, quien notó que el «poder eléctrico» producido por sus máquinas se podía transmitir a distancia a través de algunos hilos o cables. Gray llegó a la conclusión de que los metales eran conductores, mientras que otros materiales no; distinguía así entre conductores y aislantes. Con resultados como éstos, comenzó a estudiar la posibilidad de transmitir electricidad utilizando hilos metálicos suspendidos en el aire, a su vez, de otros hilos, pero éstos de seda, y consiguió llevar el «fluido» eléctrico a una distancia superior a 200 m. En otro tipo de experimentos, aunque vinculados con los anteriores, Gray exploró la transmisión de electricidad también a distancia, pero ahora sin ningún cable transmisor. En 1729 colgó un conductor de hilo de lino, y comprobó que atraía una pequeña lámina de bronce, rechazándola después cuando se le aproximaba un tubo de vidrio frotado.

Tras leer una de las cartas que Gray publicó en 1732 en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society de Londres, Charles François de Cisternay Du

Fay, o Dufay, tomó de Gilbert la idea de dos fluidos eléctricos, el vítreo, que identificó como positivo, y el resinoso o negativo, para explicar el misterio de la repulsión entre los polos del mismo signo y la atracción entre los distintos. Enunció, asimismo, como una hipótesis de trabajo, una idea que se ha mantenido hasta el presente: si un cuerpo no electrizado entra en contacto con uno que sí lo está, entonces se electriza por conducción, produciéndose el efecto de que a continuación ambos se repelen entre sí; y no se volverán a atraer hasta que haya perdido la electrización adquirida entrando en contacto con otro cuerpo.

En la continua carrera por producir nuevos instrumentos, hay uno en el que toda historia debe detenerse, la botella de Leiden, llamada así por la ciudad en la que fue inventada, en 1746, por el holandés Pieter van Musschenbroek. Tras fijar una varilla metálica en el tapón de una botella llena de agua, Musschenbroek la acercó a una máquina eléctrica con el propósito de electrizar el líquido. Pero lo que sucedió fue que la mano que sostenía la botella hizo las veces de la placa de un condensador, mientras que el agua interior representaba la otra, con el resultado de que se acumuló electricidad positiva sobre la pared interior de la botella y negativa sobre la parte exterior en contacto con la mano. La consecuencia, imprevista, fue que, acercar Musschenbroek una mano a la varilla metálica cuando aún sostenía la botella con la otra, sintió una violenta conmoción en los brazos y en el pecho. La botella de Leiden era, en definitiva, un condensador que almacenaba electricidad, formado por un recipiente forrado interior y exteriormente por finas laminas, lleno en su mayor parte de agua y cerrado con un corcho al que atravesaba una varilla o cadena, que terminaba en el exterior en una esfera, a través de la cual se electrizaba el agua. Cuando la parte exterior entraba en contacto con la tierra y la esfera exterior estaba conectada a una fuente de electricidad estática, se producía la carga de la botella. El agua se electrizaba y el forro exterior también. Para descargarla bastaba con aproximar un instrumento aislado a estos puntos; si lo hacía el sujeto que tenía la botella en la mano, sufría una descarga. La conexión de varias botellas permitía aumentar la carga disponible.

El interés que la electricidad, su naturaleza y modos de manifestarse, suscitó

durante la Ilustración se ejemplifica de manera especial en un polifacético personaje: Benjamin Franklin (1706-1790). En 1746, cuando cumplía 40 años y había alcanzado una situación profesional que le permitió una suficiente libertad, se dedicó con cierta intensidad a la ciencia, en particular al estudio de la electricidad, campo en el que defendió la idea de que existía un solo tipo de «fluido eléctrico», presente en todos los cuerpos, aun en los que aparentemente no evidenciaban rasgos de estar electrizados (en ellos su electricidad estaba en equilibrio). El proceso de electrificación, pensaba, se producía cuando una parte del fluido de un cuerpo pasaba a otro; en otras palabras, el fluido eléctrico no se creaba, únicamente se transfería, lo que significa que estaba defendiendo, de paso, otra idea que sería muy querida en el futuro: la conservación de la carga eléctrica, fluido eléctrico para él.

Independientemente de que hablemos de cargas o de fluidos eléctricos, es posible introducir un concepto que resultó esencial para la ciencia de la electricidad, la «carga eléctrica», entendida como la cantidad de electricidad que pasa de un cuerpo a otro, o la magnitud de la cualidad positiva o negativa de un cuerpo electrizado. Coherente con el principio de conservación de la carga-fluido eléctrico, la carga de un objeto macroscópico resulta ser la suma de las cargas de las partículas, o fluido, que lo forman. Es cero cuando el número de las positivas es igual al de las negativas. Una cuestión obvia surgía entonces, la de encontrar una expresión analítica, una ley, para la atracción entre cargas diferentes. Y en este punto nos encontramos con un rasgo que se da con frecuencia en la ciencia: el razonamiento por analogía; esto es, recurrir a esquemas utilizados previamente. En el caso que ahora nos ocupa, la ley de la gravedad universal que Newton formuló en 1687 proporcionó el modelo para la formulación de la fuerza electrostática. Fue un físico francés, Charles Coulomb (1736-1806), quien expuso en 1781 tal ley, que se enuncia de la forma siguiente: «La magnitud de cada una de las fuerzas electrostáticas con que actúan dos cargas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de las magnitudes de ambas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa; esto es, $F \propto Q_1 \times Q_2/r^2$ ».

§3. La pila eléctrica y la corriente eléctrica

Un momento de importancia trascendental, tanto de la historia de la electricidad como del magnetismo, aunque aparentemente afectaba únicamente a aquélla, se produjo en 1800, cuando Alessandro Volta (1747-1827) presentó un aparato que producía corriente eléctrica de manera continua y no mediante descargas, como con la botella de Leiden o a través de las máquinas electrostáticas. Pero antes de hablar de Volta, es preciso hacerlo de otro científico, que no fue físico, sino médico, el italiano Luigi Galvani (1737-1798).

En 1786, mientras estudiaba la influencia de la electricidad en la irritabilidad de los nervios de animales, Galvani observó que, cuando los nervios lumbares de una rana muerta se comunicaban con los músculos crurales por medio de un circuito metálico, éstos se contraían violentamente. Sabedor al menos desde 1780 de que la electricidad de las máquinas eléctricas producía conmociones análogas sobre ranas muertas, Galvani atribuyó el fenómeno que observó en 1786 a la existencia de una electricidad inherente a la rana, una electricidad animal que en su opinión era «producida por la actividad del cerebro, y extraída muy probablemente de la sangre», y transmitida a los músculos a través de un fluido eléctrico. Así lo manifestó en un libro titulado *Viribus electricitatis in motu musculari (Comentario sobre los efectos de la electricidad en el movimiento muscular; 1791)*.

Las tesis de Galvani fueron criticadas por Volta, que advirtió que las contracciones musculares eran mucho más enérgicas cuando el vínculo entre las dos partes de la rana estaba formado por dos metales unidos. Dedujo, en consecuencia, que la electricidad se producía en el contacto entre ambos metales y que las partes animales no desempeñaban más papel que el de conductores, sirviendo al mismo tiempo como detectores de electricidad, una especie de electros copios, muy sensibles. Tomando como base esta idea, construyó un generador de electricidad completamente diferente a la botella de Leiden, que se componía de una serie de discos apilados unos sobre otros en el orden siguiente: un disco de cobre, otro de cinc, un fragmento circular de paño empapado en agua acidulada, luego de nuevo

un disco de cobre, otro de cinc, una nueva pieza de paño, y así sucesivamente en el mismo orden, cuidando de sostener los discos mediante tres cilindros aislantes de vidrio. Se trataba de un instrumento revolucionario, ya que producía corriente eléctrica de manera continua y no mediante descargas, y ello abría de par en par las puertas al estudio de los fenómenos eléctricos.

La pila-batería de Volta volvió a sacar a la palestra el problema de la naturaleza de la electricidad, ahora manifestado por medio de la corriente eléctrica, la circulación de electricidad a través de un conductor que, unido a los dos polos de un generador, forma un circuito (la dirección de la circulación se estableció por convención, al tomar como indicador el movimiento del «vehículo de la electricidad» que, procedente del polo positivo, vuelve al negativo después de recorrer una línea de fuerza).



Alessandro Volta con su pila

Aunque el fenómeno de la electrolisis —recordemos en qué consiste este procedimiento para la separación de los elementos de un compuesto: la sustancia que se quería descomponer se fundía o disolvía en partículas y se hacía circular una corriente continua, procedente de una pila de Volta, a través de dos electrodos, dando lugar a partículas electrificadas que se depositaban en el polo de signo eléctrico contrario— proporcionó pistas sobre la posible existencia de unidades eléctricas, hubo que esperar a que en 1897 un físico de Cambridge, Joseph John Thomson, identificara el primer componente universal de la materia, el «electrón», como terminó siendo denominado.

§4. Electromagnetismo

Gracias a la batería de Volta, un catedrático de Física de la Universidad de Copenhague, Hans Christian Oersted (1777-1851), pudo realizar en 1820 un sencillo experimento. Sencillo, pero de grandes consecuencias. El experimento en cuestión permitió demostrar que la electricidad —fuese ésta lo que fuese— afectaba al magnetismo. Oersted colocó un hilo metálico horizontalmente, en la dirección del meridiano magnético, justo por encima de una aguja magnética. Mientras no circulaba ninguna corriente por el hilo, éste y la aguja continuaban estando paralelos, pero cuando se conectaba una batería de Volta al hilo, entonces la aguja se desviaba, más cuanto mayor fuese la intensidad de la corriente. Y cuando se modificaba la dirección de la corriente (cambiando el orden de la conexión a los polos de la batería), la aguja se movía en dirección contraria. Magnetismo y electricidad, hasta entonces distintos e independientes, se revelaron sensibles a la proximidad: parecía que, de alguna manera, estaban relacionados.

El hallazgo de Oersted se difundió rápidamente por la pequeña comunidad de los físicos europeos. En París, André-Marie Ampère (1775-1836) demostró experimentalmente que dos hilos paralelos por los que circulan corrientes con el mismo sentido se atraían, repeliéndose en el caso de que los sentidos fuesen opuestos. Poco después, Ampère avanzaba la expresión matemática que

representaba aquellas fuerzas. Su propósito era dar una teoría de la electricidad sin más que introducir esa fuerza (para él «a distancia») en las ecuaciones del movimiento de la mecánica newtoniana; no en vano se le llamó «el Newton de la electricidad». Pero el universo de la electricidad y del magnetismo resultó ser demasiado complejo para que semejante programa fuera factible, como se encargó de demostrar uno de los grandes nombres de la historia de la ciencia: Michael Faraday (1791-1867). En 1821, poco después de saber de los trabajos de Oersted, Faraday demostró que un hilo por el que pasa una corriente eléctrica puede girar de manera continua alrededor de un imán (y viceversa), con lo que se vio que era posible obtener efectos mecánicos (movimiento) de una corriente que interacciona con un imán. Sin pretenderlo, había sentado el principio del motor eléctrico. No obstante, en su trabajo de 1821 aún no había demostrado el efecto recíproco al obtenido el año anterior por Oersted; es decir, que la variación del magnetismo puede afectar a la electricidad. Esto es algo que conseguiría una década después, en 1831, prácticamente al mismo tiempo que lo hacía el físico estadounidense Joseph Henry (1797-1878), si bien éste se demoró en hacer públicos sus resultados.

Básicamente, lo que hizo Faraday fue lo siguiente. Enrolló en un anillo de hierro dos hilos de cobre recubiertos de algodón y, a través de uno de ellos, hizo circular una corriente eléctrica desde una batería voltaica, conectando el otro hilo a un galvanómetro. Descubrió entonces que, en el instante en que la corriente empezaba o se detenía en un hilo, se producía una breve corriente transitoria en el otro; esto es, aparecía una corriente inducida. Entonces decidió modificar el experimento: sabiendo que la corriente que circula en un hilo envuelto en espiral alrededor de una barra de hierro la magnetiza (produciendo un electroimán), vio que el hierro que había utilizado tenía que magnetizarse por la corriente principal y dedujo que la corriente secundaria transitoria se debía a la magnetización o desmagnetización del núcleo de hierro. Entonces enrolló alrededor de una barra de hierro una bobina de hilo aislante y conectó los extremos a un galvanómetro, descubriendo que, cuando se situaba esta barra en los polos de un imán permanente de acero, se creaba una corriente eléctrica inducida en el hilo que envolvía la barra. Igualmente notó que

cuando se quitaba la barra de ahí también aparecía una corriente secundaria breve, pero en el sentido contrario a la corriente que existía cuando se acercaba a los polos magnéticos. Se dio cuenta entonces de que esta corriente inducida tenía que deberse a la inserción o eliminación de líneas de fuerza magnética de la bobina secundaria, y dedujo que, si un hilo de cobre conectado a un galvanómetro se movía entre los polos de un imán y a través de las líneas de fuerza magnética, como para cortarlas (simplemente metiendo y sacando el hilo de entre los polos del imán), se induciría una corriente en el hilo. Hizo el experimento —aparentemente, sólo aparentemente, sencillo—, uno de los más trascendentes de la historia por las consecuencias prácticas, tecnológicas, que se derivaron de él, y encontró lo que suponía.

Finalmente, y en otro golpe de genialidad, Faraday efectuó otro experimento: tomó un disco de cobre con un muelle de contacto presionando contra su eje y otro contra su perímetro, los dos conectados a un galvanómetro, hizo que girase rápidamente en un campo magnético, con las líneas de fuerza de éste perpendiculares al plano del disco, y comprobó que se creaba una corriente eléctrica constante que circulaba a través del galvanómetro mientras el disco giraba. De esta manera nació la primera y rudimentaria dinamo, o máquina para generar corrientes eléctricas sólo con el movimiento de un conductor de cobre en un campo magnético. Si la máquina de vapor había proporcionado la energía necesaria para extraer el agua de las minas y aumentar la producción de carbón que alimentó las distintas máquinas que transformaron el proceso de producción, afectando de esta manera profundamente a la sociedad (la Revolución Industrial), la producción de corriente eléctrica en grandes cantidades que permitió la invención por Faraday de la dinamo terminó teniendo efectos similares.

Aunque pertenece al dominio de la tecnología, es importante señalar que, tras el descubrimiento de Oersted y de que Johann Schweigger y Johann Christian Poggendorff construyesen en 1820 y 1821 los primeros galvanómetros, Ampere y Pierre Simon de Laplace propusieron la idea de telégrafos electromagnéticos que utilizasen bobinas y agujas magnéticas en el extremo receptor, en un número igual al de los caracteres que se deseaban emplear en la transmisión. De hecho, Harrison

Gray Dyar construyó una línea telegráfica en Long Island, Nueva York, que funcionó entre 1828 y 1829, en la que los mensajes se recogían mediante procedimientos electroquímicos en una banda de papel. Vinieron después otros avances en sentido parecido, entre los que es obligado recordar el debido al estadounidense Samuel Finley Morse, que en abril de 1838 obtuvo una patente de un sistema que incorporaba la idea de su luego famoso código.

Poco a poco, pero luego con velocidad creciente, se fueron estableciendo líneas telegráficas, terrestres primero y submarinas después. Un problema importante que afectaba a las marinas era que la conductibilidad del agua salada exigía que cualquier cable depositado en el fondo del mar estuviese recubierto de un buen aislante para que no perdiera la electricidad que pasaba por él. Ocurría, no obstante, que las sustancias naturales que podrían servir de revestimiento aislante o eran muy caras o, como en el caso del caucho, se deterioraban rápidamente en el medio marino. En 1849 esta situación cambió radicalmente con la introducción en Europa, procedente de China, de un nuevo material muy parecido al caucho, pero que tenía sobre éste la gran ventaja de ser inalterable con el agua, dulce o salada: la gutapercha. Empleándola como recubrimiento, se logró, tras un intento fallido, unir Dover y Calais. Un año más tarde, la línea se completaba con la unión directa entre Londres y París. Durante los años siguientes se tendieron nuevas líneas a lo largo y ancho del mundo, lo que culminó en el establecimiento, en 1866, de un cable telegráfico submarino que unió Europa con Norteamérica. El impacto popular de semejante acontecimiento fue grande. Al fin y al cabo se había conseguido reducir una larga travesía marítima a unos breves instantes, en lo que a comunicaciones se refiere. Políticos, militares, hombres de negocios y toda la sociedad, en definitiva, tuvieron que aprender nuevos modos de comportamiento. Cambió el mundo, el mundo de la política, el mundo de los negocios y de las relaciones internacionales. Más correctamente: la física de la electricidad y el magnetismo cambiaron el mundo, y nadie pudo dejar de advertir este hecho. La ciencia dejaba así el estrecho dominio de los gabinetes, las aulas o las reales academias, y entraba en los hogares, que ya se podían iluminar de otra manera (con luz blanca), en los transportes, con

trenes eléctricos subterráneos que ahora llamamos «metros», en las comunicaciones, en la industria, en la política, en definitiva, en todas partes.

§5. Electrodinámica

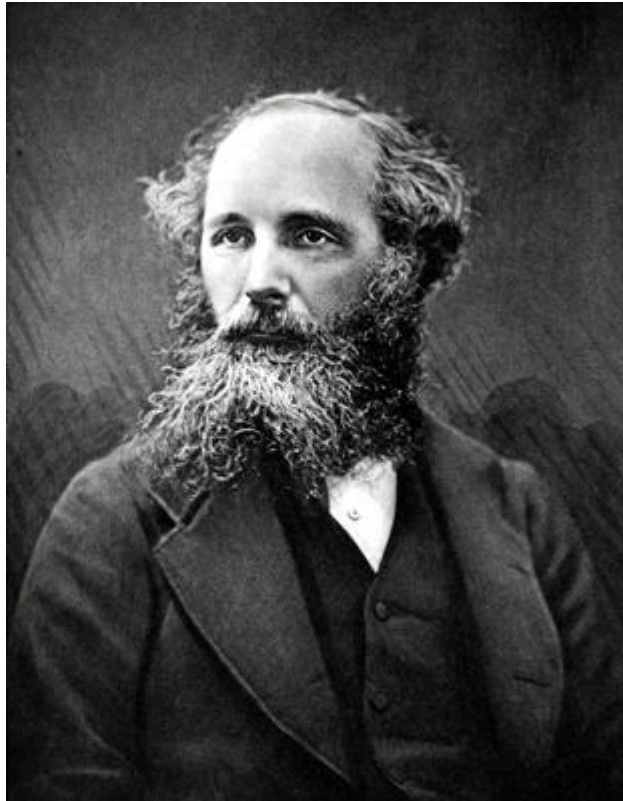
La intuición natural y la habilidad experimental de Faraday hicieron avanzar sustancialmente el estudio de los fenómenos electromagnéticos, pero para poder desarrollar una teoría del electromagnetismo se necesitaba otro tipo de científico. No hubo que esperar mucho ni alejarse de Inglaterra para que tal personaje apareciera: James Clerk Maxwell, cuyo nombre ya ha aparecido anteriormente con relación a la física estadística. Él fue capaz de unir todos los cabos sueltos que proliferaban en la electricidad y el magnetismo e, introduciendo ideas nuevas, formular una teoría completa del campo electromagnético.

Expresado de manera sintética, la teoría a la que llegó Maxwell en la década de 1860 estaba constituida por un conjunto de doce ecuaciones en derivadas parciales (cuatro grupos de tres ecuaciones vectoriales), donde las incógnitas eran una serie de funciones que determinaban una estructura — una función— continua que transmitía las fuerzas, la interacción electromagnética. Esa estructura continua es lo que denominamos «campo electromagnético». Constatamos, por consiguiente, que al contrario de lo que sucedía con la dinámica que había propuesto Newton en sus *Principia*, en donde, como vimos, la interacción se transmitía a distancia, sin ningún tipo de soporte (la ley de Coulomb también seguía este mismo modelo), la explicación de Maxwell se basaba en un medio continuo, el campo electromagnético, también llamado en ocasiones «éter electromagnético». Este modelo, el de las teorías de campos, que no violenta nuestras capacidades cognitivas, terminaría por imponerse en la física del futuro.

El campo electromagnético no es un mero ente teórico que toma su sentido dentro de un sistema teórico: tiene realidad física. Ahora bien, «realidad física» implica que posea energía. ¿Y cómo se define la energía del campo electromagnético?

La respuesta a esta sutil pregunta, una pregunta que se plantea en prácticamente todos los casos en los que se habla de la energía de un sistema, salvo en el más

intuitivo de la energía mecánica (de la que ya tratamos), se encuentra en un artículo («Sobre la transferencia de energía en el campo electromagnético») que John Henry Poynting publicó en 1884 en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society.



James Clerk Maxwell

Se trata del teorema de Poynting, un teorema de conservación de la energía en el que todos los sumandos que aparecen en la ecuación, menos uno, se identifican como referentes a la energía de las cargas eléctricas que producen el campo electromagnético, mientras que aquél debe corresponder a la energía del campo electromagnético. Y si podemos adjudicar energía a un ente introducido en una teoría física —como es el caso del campo electromagnético en la electrodinámica de Maxwell—, entonces éste posee realidad física. «La existencia de corrientes inducidas y de las acciones electromagnéticas a distancia del circuito primario del que extraen su energía», escribía Poynting en los primeros compases de su artículo, *nos ha*

conducido, bajo la guía de Faraday y Maxwell, a considerar que el medio que rodea al conductor desempeña un papel muy importante en el desarrollo del fenómeno. Si creemos en la continuidad del movimiento de la energía; esto es, si creemos que cuando ésta desaparece en un punto y reaparece en otro debe haber pasado por el espacio que separa a tales puntos, nos vemos forzados a concluir que el medio en cuestión contiene al menos parte de la energía y que es capaz de transmitirla de un punto a otro.

En general, únicamente sabemos definir la energía cuando existe una ley de conservación. Y las leyes de conservación están asociadas a simetrías o invariancias, como se demostró en las primeras décadas del siglo XX, especialmente gracias a un resultado, un teorema, encontrado en 1915 (pero publicado en 1918) por la matemática alemana Emmy Noether. De hecho, en la mecánica newtoniana la conservación de la energía está asociada a —o es una consecuencia de— la invariancia bajo traslación temporal (no importa qué origen tomemos para el tiempo).

Muy importante en la consolidación de la electrodinámica propuesta por Maxwell fueron los experimentos que en 1888 llevó a cabo un antiguo alumno de Helmholtz, Heinrich Hertz, que demostró que en situaciones adecuadas el campo electromagnético contenía ondas que se propagaban en el espacio con la misma velocidad que la luz, que, como veremos en el capítulo siguiente, no es sino una onda electromagnética.

§6. La transmisión de electricidad

Con los procedimientos de electricidad inducida introducidos por Faraday, era posible producir electricidad, pero ¿cómo transportarla a distancia, para ser utilizada en lugares alejados de la fuente, como, por ejemplo, un salto de agua? Aunque en 1875, una industria, la Niágara Falls Hydraulic Power, había puesto en marcha en las cataratas del Niágara un sistema de producción de electricidad recurriendo a turbinas de motor de agua, no encontró más clientes, próximos, que

un molinero. El problema de enviar la electricidad a grandes distancias se benefició de desarrollos como los del físico e ingeniero croata, nacionalizado estadounidense después, Nikola Tesla (1856-1943), que en 1883 inventó un transformador que al cambiar el sentido de la corriente convertía la corriente continua en alterna, produciendo un alto voltaje, y que en 1888 creó un sistema eléctrico que utilizaba corriente alterna. George Westinghouse, el principal competidor (y defensor de la corriente continua) de Thomas A. Edison (1847-1931), compró las patentes y se preparó para la inevitable victoria de la corriente alterna. En 1893 iluminó la Exposición Internacional de Chicago y tres años después, con la Compañía del Niágara, abastecieron a la ciudad de Buffalo, situada a 209 km de distancia: se había realizado la primera transmisión a larga distancia.

Los resultados obtenidos por Hertz introdujeron nuevas dimensiones en el mundo de la transmisión de señales eléctricas, atrayendo la atención sobre al problema de la comunicación sin hilos, un mundo científico-técnico en el que sobresalió el italiano Guglielmo Marconi (1874-1937). En 1898, Marconi logró conectar la bahía de Alum, en la isla de Wight, con Bournemouth, separados por una distancia de algo más de 20 km; en 1899 establecía la primera conexión internacional entre Folkestone y Boulogne (52 km), transmitiendo los primeros mensajes en abril; en 1900 formaba la Marconi International Marine Communications Company. El año siguiente fue capaz de transmitir señales que cruzaron el Atlántico, algo en principio sorprendente, ya que la Tierra es redonda y se suponía que las ondas electromagnéticas se propagaban en línea recta: la explicación llegó 20 años más tarde, cuando el físico británico Edward Appleton descubrió que existe en la alta atmósfera una capa electrizada en la que rebotan las señales emitidas, volviendo a la superficie terrestre.

Para avanzar en esta senda, la de la transmisión de señales electromagnéticas a grandes distancias, serían necesarios avances tecnológicos que favoreciesen la emisión y recepción de esas señales. Uno de esos avances fue la válvula con dos electrodos (o diodo) que inventó en 1904 John Ambrose Fleming, a la que siguió otra, un tríodo, desarrollada en 1906 por el inventor norteamericano Lee De Forest.

Con ellas fue posible enviar señales más potentes, reemplazando auriculares por altavoces, y transmitir sonidos —como música o diálogos— en lugar de pulsos de señales.

Capítulo 11

La luz, mágica emanación

Contenido:

§1. La visión

§2. De Kepler a los «corpúsculos» de Newton

§3. La luz, un fenómeno ondulatorio

§4. La velocidad de la luz

§5. La luz, un fenómeno electromagnético

§1. La visión

En primera instancia, los humanos conocemos el mundo gracias a uno de nuestros sentidos: la visión. Para observar es necesario ver, y vemos mediante la luz, una forma de energía con la que reaccionan órganos corporales como los ojos y el cerebro.

La naturaleza luminosa del Sol era una evidencia, habida cuenta de la sucesión del día y la noche, pero la visión requería el contacto, de alguna manera, entre el objeto y el ojo. La falta de acuerdo a la hora de determinar el origen de la luz multiplicó las especulaciones. Para Empédocles, la luz era un fluido que emanaba de los objetos e incidía en el ojo (intromisión), mientras que Arquitas de Tarento (siglo IV a. C.) pensaba que de los ojos salían unos tipos de emanaciones que entraban en contacto con los objetos captando su forma, algo así como un fuego invisible que descubría las formas y colores de las cosas iluminadas (extramisión). Los atomistas, de Leucipo (siglo V a. C.) a Lucrecio (siglo I a. C.), imaginaron que la luz del Sol desprendía partículas de los cuerpos iluminados que llevaban al ojo la imagen del objeto. Demócrito (siglos V-IV a. C.) pensó que el contacto se producía en virtud de la presión del objeto sobre el aire y de éste sobre el ojo, mientras que, por aquella misma época, Platón imaginó que la luz que salía de los ojos, al igual que la producida por el Sol, hacían, cuando iluminaban un objeto, que éste emitiese partículas de fuego que a su vez incidían en los ojos. Por su parte, Aristóteles

rechazó la extramisión y distinguió tres momentos en la visión: la iluminación del Sol (o de, por ejemplo, una candela), la reflexión de la luz en los objetos, que se comunica a través de un medio diáfano y transparente, de forma que la transmisión es instantánea, y el mecanismo (fisiológico) de la visión.

En el siglo IV a. C., Euclides asumió la extramisión («los rayos de luz parten del ojo y se dirigen hacia los objetos formando un cono, del que el ojo es el vértice») y postuló el carácter rectilíneo de los rayos («1, los rayos de luz siguen una línea recta hasta el objeto; 2, las líneas rectas que iluminan un objeto forman un cono; 3, sólo es visible aquello sobre lo que inciden las líneas»). De hecho, Euclides nos legó un libro sobre *Óptica*, en una de cuyas proposiciones (la XIX) se formulaba, a partir de observaciones, la ley de la reflexión, la que enuncia que el ángulo de incidencia de un rayo de luz —que, sostenía, seguía una línea recta— es igual al de reflexión, una proposición que también utilizó más tarde, en sus más complejos estudios ópticos, Herón de Alejandría (c. 75), concretamente en su *Catóptrica*. Poco después, Ptolomeo trató de dar una explicación a la ley de la reflexión, comparando la de los rayos de luz con el rebote de proyectiles, e incorporando además a la visión directa y refleja la refracción («dióptrica») que se produce al pasar de un medio a otro de distinta densidad: del aire al agua, del aire al cristal y del agua al cristal.

Notables fueron, un milenio después, las contribuciones de Ali al-Hasan Ibn al-Haytam, esto es, Alhacén (965-1038) —ya comentamos la latinización de su nombre cuando lo mencionamos, brevemente, en el capítulo 1—. Nacido en Basora, se distinguió sobre todo en el campo de las matemáticas (teoría de números, álgebra, geometría), aunque muchos de sus trabajos se han perdido. Fue, sin embargo, la obra que dedicó a la óptica la que ejerció mayor influencia. En ella integró los diferentes aspectos de la visión — anatómicos, fisiológicos y geométricos— en el mismo modelo. En el *Kitab al-Manazir (El libro de la óptica)* ofreció una explicación de la visión que mejoraba las anteriores, utilizando para ello una cámara oscura, con la que demostraba que los rayos procedentes de distintas fuentes no se confundían en uno. Postuló que cada uno de los puntos del

objeto emitía rayos que se dirigían en línea recta en todas direcciones e incidían en la córnea con energía suficiente para reproducir la imagen, que se comunicaba al cristalino y a la retina. Mantuvo, asimismo, que la luz tarda un tiempo, pequeño pero finito, en alcanzar un lugar desde la fuente que la emite, y que las lentes cóncavas amplifican las imágenes. De hecho, *El libro de la óptica* de Alhacén, traducido al latín a finales del siglo XII o principios del XIII, incluye la primera imagen de una de estas lentes, aunque sabemos que por entonces (siglos XI y XII) los vikingos habían tallado lentes que usaban para encender el fuego.

§2. De Kepler a los «corpúsculos» de Newton

En la época que apareció la versión latina del *Kitab al-Manazir* de Alhacén, un estudioso polaco del siglo XIII, Vitelo, de cuya vida se sabe muy poco (estudió en Padua y París), escribió un libro titulado *Perspectiva u Opticae*, el principal tratado de óptica de la Edad Media y del Renacimiento, el único auténtico rival, en lo que altura científica se refiere, de los textos de Alhacén. Johannes Kepler tuvo la obra de Vitelo como una de sus referencias principales en sus estudios ópticos, como se comprueba sin más que observar el título de su gran libro de óptica: *Ad Vitellionem Paralipomena quibus Astronomiae pars Optica Traditur (Comentarios a Vitelo, en el que se trata de la parte óptica de la astronomía)*, publicado en 1604. El motivo que le llevó a estos estudios fueron sus propios intereses astronómicos. Veamos lo que en este sentido escribió en el «Prefacio» de este libro:

Como todas las observaciones celestes tienen lugar a través de la mediación de luz o sombra, y como el medio entre las estrellas y el ojo presenta una variedad de modificaciones, y como esas cosas que observamos en los cielos son bien movimientos [...], arcos (esto es, ángulos en el observador) o cuerpos luminosos; y como todos estos son considerados en la ciencia óptica, surge una tercera parte de la astronomía, una parte óptica, de la que trato aquí, mediante un breve resumen [...] de las viejas cosas que Vitelo trató de forma metódica, o las nuevas que Tycho Brahe trató acá y allá, sobre este tema.

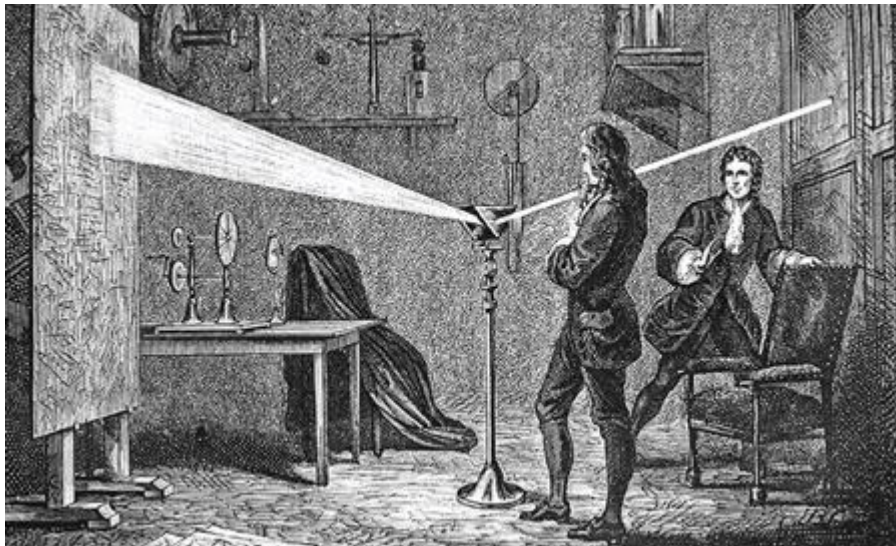
De hecho, la edición que utilizó Kepler fue una de la *Opticae thesaurus* de Risner, que incluía las obras de Alhacén y Vitelo en un volumen conjunto, aunque con dos paginaciones diferentes. En cuanto a las referencias a Brahe, tienen que ver con un problema relativo a parte de la iluminación de la Luna que le corresponde a Venus: en *Ad Vitellionem* Kepler asignaba a Brahe la idea de «la causa de esta luz a Venus, que puede ser capaz de iluminar a la Luna con tanta brillantez».

También Descartes se ocupó de la óptica, dominio que abordó en uno de los tres tratados que acompañaban a su célebre *Discurso del método* (1637): la *Dióptrica*. Aunque no dejó de presentar una serie de posibles teorías acerca de la naturaleza de la luz, el interés de Descartes era fisiológico, por una parte, y por otra estudiar las trayectorias de los rayos de luz; en este sentido escribía: «No teniendo otro motivo para hablar sobre la luz que el de explicar cómo sus rayos penetran en el ojo y cómo pueden ser desviados por los diversos cuerpos que alcanzan, no creo necesario incluir en mi proyecto el problema relacionado con cuál sea su naturaleza». Fue Isaac Newton quien dio un mayor impulso en la comprensión de qué es la luz. Estimulado por los cursos de óptica de Isaac Barrow en Cambridge y también por los trabajos de Descartes, hacia 1664 Newton comenzó a interesarse por los fenómenos ópticos. No fue, sin embargo, hasta 1666 (año que pasó en la finca familiar de Woolsthorpe debido a una epidemia que obligó a cerrar la universidad en agosto de 1665) cuando intensificó sus esfuerzos, recurriendo a un instrumento simple pero en sus manos extremadamente precioso: un prisma de vidrio. He aquí cómo se refirió al inicio de sus experimentos en el artículo que publicó en el número del 19 de febrero de 1672 de las *Philosophical Transactions* de la Royal Society:

A comienzos del año 1666 (momento en el que me apliqué a pulir cristales ópticos de formas distintas a la esférica) me proporcioné un prisma triangular de cristal, para ocuparme con él del celebrado Fenómeno de los Colores. Habiendo oscurecido mi habitación, hice un pequeño agujero en una contraventana, para dejar pasar sólo una cantidad conveniente de luz

del Sol, y coloqué mi prisma en su entrada, de manera que pudiese ser refractado en la pared opuesta. Al principio, ver los vivos e intensos colores así producidos constituyó una muy entretenida distracción, pero después de un rato intentando considerarlos más cuidadosamente, me sorprendió verlos en forma oblonga, cuando, según las leyes aceptadas de la Refracción, esperaba que hubiesen sido circulares.

Semejante anomalía le indujo a recurrir a un segundo prisma, con el que llegó a la conclusión de que los colores que aparecían al pasar la luz blanca inicial por los prismas no eran «cualidades de luz, derivadas de refracciones o reflexiones de cuerpos naturales (como se cree generalmente), sino propiedades originales o innatas». La luz visible se convertía, en consecuencia, en la combinación de diferentes colores elementales, como muestra con particular claridad el arco iris.



Isaac Newton descomponiendo la luz en los colores elementales, utilizando un prisma de cristal

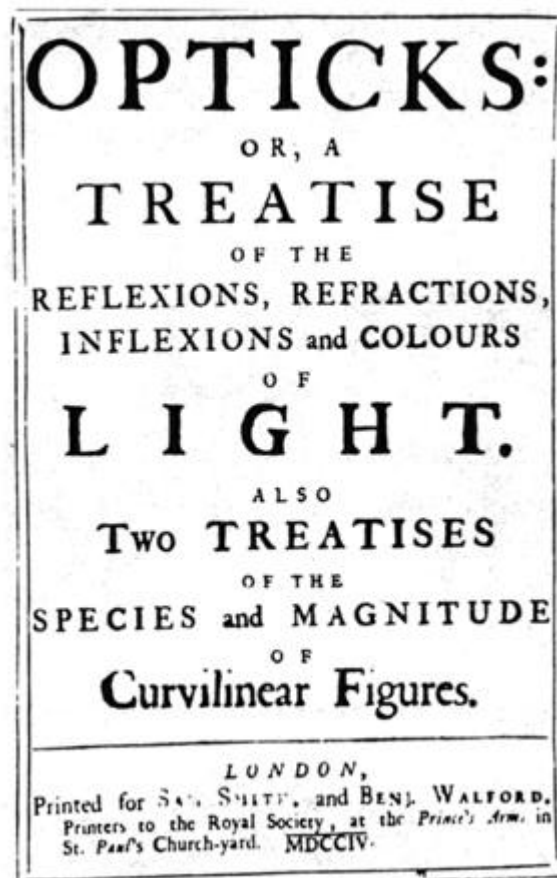
En cuanto a cuál era la estructura, o naturaleza, de la luz, Newton defendió la idea de que estaba compuesta por pequeños corpúsculos. En su otro gran libro, la *Opticks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of*

Light (Óptica, o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz; 1704), dominado sobre todo por la exposición de experimentos, más concretamente en una de las «Cuestiones», la 29 (según la cuarta edición), expuso sus ideas al respecto, una ideas que sabía eran básicamente especulaciones (de ahí que las incluyese en esta «Cuestiones»):

¿Acaso los rayos de luz no son cuerpos pequeñísimos emitidos por las sustancias luminosas? En efecto, tales cuerpos habrán de pasar por los medios uniformes en línea recta sin doblarse hacia la sombra, tal como ocurre con la naturaleza de los rayos de luz [...]. Las sustancias transparentes actúan a distancia sobre los rayos de luz al refractarlos, reflejarlos o inflexionarlos a la vez que, por su parte, los rayos de luz agitan a distancia las partes de esas sustancias para calentarlos.

En las últimas líneas de esta cita se observa cuál era el deseo de Newton: encontrar leyes de fuerza a distancia que, aplicadas a los corpúsculos de luz, pudiesen explicar sus comportamientos, lo mismo que, por ejemplo, la ley de la gravitación explicaba el movimiento de los cuerpos gravitantes. En otra de las «Cuestiones», la 28, se comprueba cuáles eran sus ideas respecto a otras hipótesis sobre la naturaleza de la luz: «¿Acaso no son erróneas todas las hipótesis en las que se supone que la luz consiste en una presión o movimiento propagado a través de un medio fluido?»

La hipótesis a la que se refería aquí Newton, la de movimientos propagados a través de un medio continuo, era consistente con la física del continuo defendida por los cartesianos; así, Christiaan Huygens sostenía que la luz no era sino un movimiento oscilatorio en un medio continuo. Como sabemos, esta idea está más cerca de la que, como enseguida veremos, finalmente se impuso (en el terreno de la física clásica, no de la cuántica), pero la influencia de Newton, la solidez y cantidad de experimentos incluidos en la *Óptica*, un libro mucho más leído a lo largo de la historia que los *Principia*, ayudaron a que sus ideas mecanicistas sobre la luz fueran seguidas por muchos.



Portada de Opticks, de Isaac Newton (1704)

Antes de abandonar a Newton, mencionaremos que sus análisis de la dispersión y composición de la luz le sugirieron una forma de perfeccionar el telescopio. He aquí cómo se refirió a este punto en el artículo de 1672 antes citado:

Comprendí entonces que la perfección de los telescopios había sido limitada hasta ahora, no tanto por la falta de lentes correctoras formadas según las instrucciones de los autores de óptica (tal y como se había supuesto), sino porque la luz misma está hecha con una mezcla heterogénea de rayos que se refractan de manera diversa. Así que, aunque una lente estuviera perfectamente formada para recoger todos los rayos en un solo punto, no podría recoger en el mismo punto todos los que, con la misma incidencia, experimentarían en ese mismo punto una distinta refracción. Más aún, me

maravillé que, siendo el índice de refrangibilidad tan grande como lo hallé, hubieran alcanzado los telescopios su actual grado de perfección [...]. Esto me hizo pensar en las reflexiones y, al encontrarlas regulares, es decir, que el ángulo de reflexión de cualquier tipo de rayo era igual al ángulo de incidencia, comprendí que debido a la reflexión los instrumentos ópticos podrían alcanzar cualquier grado de perfección imaginable, siempre que tengamos una superficie reflectante que pudiera pulirse tan delicadamente como el cristal y que reflejara tanta luz como la que transmite el cristal, así como disponer del arte para dotarla con una forma parabólica.

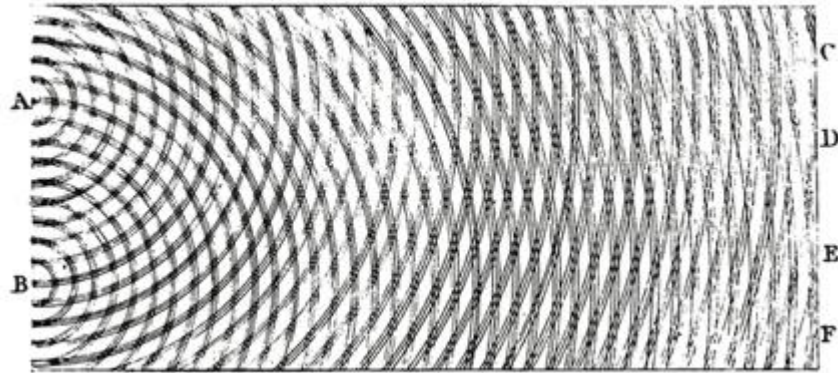
Tan hábil manualmente como genial teórico, él mismo construyó un telescopio reflector, que superaba a los hasta entonces en uso, eliminando la aberración cromática propia de las lentes. De hecho, construyó dos: uno lo guardó para utilizarlo él mismo y el otro lo donó a la Royal Society, como reconocimiento por haberle elegido uno de sus miembros (el número 290) el 11 de enero de 1672. En el futuro, los telescopios reflectores se impondrían para escudriñar el cosmos.

§3. La luz, un fenómeno ondulatorio

Justo al principio del siglo XIX la situación cambió profundamente con respecto a la teoría ondulatoria. Y el primer responsable de ello fue un inglés, Thomas Young (1773-1829).

En trabajos que publicó entre 1800 y 1804, y luego en su conocido libro *Course of Lectures on Natural Philosophy* (1807), el polifacético (fue físico, fisiólogo y egiptólogo) Young defendió la vieja teoría ondulatoria de la luz tomando como base una serie de experimentos que realizó para producir la interferencia de las ondas luminosas procedentes de dos hendiduras próximas. «Cuando dos partes de la misma luz alcanzan el ojo por dos caminos diferentes de direcciones próximas», se lee en un artículo que publicó en 1802 en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society, «la intensidad es máxima si la diferencia de los caminos recorridos es múltiplo de una cierta longitud, y mínima en el estado intermedio». La imagen

de la luz como una onda permitía entender fácilmente este resultado, así como los denominados «anillos de Newton», observados en láminas delgadas de mica y en pompas de jabón por Hooke, Boyle y el propio Newton.



Interferencias de la luz, considerada una onda. Diagrama de Thomas Young

Al recurrir al modelo ondulatorio, Young tuvo, inevitablemente, que interesarse también por el medio —un éter— que transmitía tales ondas, cuestión para la que encontró apoyo en el campo de la electricidad: «que existe realmente un medio parecido, en muchos aspectos, a lo que se ha denominado éter», escribía en un artículo titulado «Esbozos de experimentos y preguntas relativos al sonido y la luz» (*Philosophical Transactions*, enero de 1800), «lo prueba sin lugar a dudas el fenómeno de la electricidad». Trató, por ejemplo, de encontrar una explicación para la aberración estelar: si se considera que la luz se propaga como una onda, el que su trayectoria aparezca a lo largo de la dirección c' parece indicar que el movimiento de la Tierra a través del éter no afecta a este medio ni a su movimiento; esto es, que la Tierra no arrastra consigo al éter: «Al considerar», escribía Young en 1804, «el fenómeno de la aberración de las estrellas, estoy dispuesto a creer que el éter luminífero impregna la sustancia de todos los cuerpos materiales con pequeña o nula resistencia». Esta cuestión, la de si la Tierra arrastra o no al éter, se convertiría en uno de los problemas básicos para la óptica ondulatoria.

A pesar de la importancia que desde nuestra perspectiva actual tienen las ideas de

Young, al principio no fueron suficientes para cuestionar seriamente el modelo corpuscular newtoniano; más aún si tenemos en cuenta que éste continuó recibiendo apoyos de científicos tan ilustres como Laplace y François Arago. Uno de los problemas que abordó Arago resultaría particularmente importante; el de la aberración de la luz en un medio ópticamente denso (un prisma, por ejemplo), según la luz procedente de una estrella pasase a través del prisma en la misma dirección y sentido de la Tierra o en sentido opuesto. De acuerdo con la teoría corpuscular, debería producirse una diferencia —proporcional a v/c — en el ángulo de desviación, pero en las observaciones que realizó en 1808-1809 no halló ninguna. La teoría corpuscular no estaba, por consiguiente, exenta de dificultades. Y pronto surgirían más con el descubrimiento de la polarización, el fenómeno que consiste en una rotación del plano de vibración de un rayo de luz al que se hace atravesar un aparato (denominado «polarímetro») que «polariza» la luz; esto es, que deja pasar únicamente un haz rectilíneo de luz. La polarización de la luz fue descubierta en 1810 por Etienne-Louis Malus mientras estudiaba la refracción de la luz al atravesar cristales opacos. Aunque lo intentó, las explicaciones que dio Malus del nuevo fenómeno no fueron satisfactorias, como tampoco lo fueron las más elaboradas de Jean Baptiste Biot, que comprobó que algunos sólidos y líquidos hacían girar el plano de polarización de la luz (1816).

A pesar de los esfuerzos de Biot por relacionar los posibles efectos moleculares que provocaba el paso de la luz a través de un medio con sus comportamientos macroscópicos, ni sus análisis teóricos ni los experimentos ópticos que realizó pudieron competir con los que llevó a cabo (especialmente en la década de 1820) un compatriota suyo, Augustin Fresnel (1788-1827), en los que la idea de que la luz era un fenómeno ondulatorio estaba plenamente integrada. Así, diseñó una serie de ingeniosos experimentos con los que demostró numéricamente que las teorías de emisión newtonianas no podían superar a la ondulatoria. Para explicar la polarización, Fresnel sostuvo que las ondas lumínicas eran transversales (esto es, que vibraban en la dirección perpendicular a la del movimiento), mientras que antes Huygens y Young habían defendido la tesis opuesta: que las ondas eran

longitudinales (vibración en la misma dirección que el movimiento).

Defensor como era del modelo ondulatorio, Fresnel trató de explicar el resultado de las observaciones de Arago. Y para ello introdujo la idea de un arrastre parcial del éter. Supuso, en efecto, que la «densidad etérea» de todos los cuerpos es proporcional al cuadrado de un índice de refracción, n , y que cuando un cuerpo está en movimiento transporta dentro de él parte del éter; de manera más precisa, propuso que arrastra aquella parte que constituye el exceso de su densidad con respecto a la densidad del éter en el vacío. A partir de estas hipótesis, introdujo lo que sería denominado «coeficiente de arrastre de Fresnel», k :

$$k = 1 - 1/n$$

La trascendencia del coeficiente de arrastre residió durante algunos años en que permitía explicar los experimentos de Arago. Así pues, aun siendo importante, su alcance era limitado, en tanto que había sido ideado por Fresnel para dar sentido, de manera *ad hoc*, a un experimento. Esta situación cambió cuando en 1851 Armand Fizeau confirmó la utilidad del coeficiente de arrastre en experimentos que realizó estudiando la propagación de la luz en un fluido en movimiento. A partir de entonces, no quedó duda de que cualquier teoría que se elaborase debería ser capaz de deducirlo de sus premisas.

§4. La velocidad de la luz

La primera evidencia directa de que la velocidad a la que se propaga la luz no es infinita provino del astrónomo danés Olaus Römer (1644-1710), que propuso que las discrepancias en las medidas de los periodos de revolución de Io, uno de los satélites de Júpiter, descubiertos por Galileo en 1609-1610, se debían a que se realizaban cuando la Tierra se encontraba en posiciones diferentes de su trayectoria en torno al Sol y que, por consiguiente, la luz proveniente de Io debía recorrer distancias distintas. Basándose en esta idea, a comienzos de septiembre de 1675 Römer predijo que el 9 de noviembre Io emergería del cono de sombra producido

por Júpiter diez minutos más tarde, predicción que fue verificada por los astrónomos parisienses, reforzando de esta manera la tesis de la finitud de la velocidad de la luz. A lo largo del tiempo se han dado valores diferentes para el cálculo que supuestamente hizo Römer de la velocidad de la luz, cuando en realidad él no suministró ningún valor, interesado como estaba únicamente en si esa velocidad era finita.

El siguiente avance en esta cuestión procedió de un astrónomo inglés, James Bradley (1693-1762). En 1728 publicó un artículo en el que presentaba las consecuencias que derivaba de un fenómeno descubierto por él mismo, denominado «aberración estelar», un efecto distinto al bien conocido de antiguo paralaje (diferencia entre las posiciones aparentes que en la bóveda celeste tiene un astro, según el punto desde el que se observa). Básicamente, la aberración estelar se debe a la diferencia entre la posición observada de una estrella y su posición real, diferencia debida a la combinación de la velocidad del observador y la velocidad de la luz. Un telescopio —razonaba Bradley— suministra la verdadera posición de una estrella sólo si el movimiento de la Tierra coincide con la dirección de la luz que llega de la estrella; en caso contrario, hay que inclinar el telescopio en el sentido del movimiento de la Tierra, para que la luz lo atravesase según su eje. Esta desviación es máxima cuando los dos movimientos son perpendiculares, y nula cuando coinciden sus direcciones. Ahora bien, como la Tierra cambia continuamente de dirección en su órbita alrededor del Sol, vemos la estrella como si fuese ella la que varía constantemente de posición. Mediante una serie de cálculos no muy complicados y basándose en la teoría corpuscular de la luz, Bradley halló que, de forma aproximada, el valor de esa aberración astronómica era igual al cociente v/c , donde v es la velocidad de la Tierra alrededor del Sol y c la velocidad de la luz. Y como fue capaz de medir el valor de la aberración, dedujo que la luz se propagaba con una velocidad de 298.500 km/s.

La primera determinación no astronómica de la velocidad de la luz la obtuvo —la anunció en 1849— Armand Fizeau, utilizando una rueda dentada que podía girar con una velocidad variable. Cuando el disco estaba en reposo, enviaba un rayo de

luz desde el lado del observador que miraba al disco, de manera que pasara por uno de los dientes, llegase a un espejo y fuese reflejada por éste de vuelta al observador. A continuación se ponía en movimiento la rueda, y llegaba un momento en el que la luz reflejada era bloqueada por el siguiente diente. A una velocidad mayor, la luz podía pasar por ese diente y, como se conocía la velocidad de giro de la rueda, era posible calcular el tiempo que tardaba en colocarse en la posición adecuada el segundo diente. Y se podían utilizar estos datos, junto a la distancia conocida entre el espejo y el observador, para calcular la velocidad de la luz, que Fizeau estimó en 315.688 km/s.

Llegaron luego otros métodos y otras estimaciones; por ejemplo, las obtenidas por Léon Foucault en 1862 o por Albert A. Michelson (1825-1931), que dedicó una parte importante de su carrera a este problema: su mejor resultado es el que obtuvo en 1927: 299.789 km/s.

§5. La luz, un fenómeno electromagnético

La certeza de que la luz es un fenómeno de naturaleza ondulatoria, y más concretamente electromagnético, es algo que se debe a James Clerk Maxwell. Maxwell anunció la unificación entre óptica y electromagnetismo en un artículo titulado «Sobre las líneas físicas de fuerza» (*Philosophical Magazine*; 1861-1862). Cuando se lee este artículo, en concreto la tercera parte («La teoría de vórtices moleculares aplicada a la electricidad estática»), vemos cómo, al calcular la velocidad de las ondas transversales a partir del cociente entre fuerzas eléctricas y magnéticas, Maxwell encontró el valor conocido para la velocidad de la luz. Casi siglo y medio después de que fuesen escritas esas palabras, todavía se puede apreciar la excitación que sentía Maxwell cuando escribió: «Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste de ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos».

Como sucede en algunas ocasiones cuando se dispone de una nueva teoría fundamental, ésta no sólo describe aquellos fenómenos para los que en principio fue diseñada, sino que explica y predice otros. En el caso que nos ocupa, el

descubrimiento fue que las ondas luminosas eran ondas de fuerzas eléctricas y magnéticas, o, lo que es lo mismo, que la óptica quedaba englobada en el electromagnetismo, una conclusión que se vio reforzada de manera aparentemente definitiva (sería la física cuántica la que años más tarde pondría límites a esta afirmación) con los experimentos —a los que ya nos referimos— que en 1888 llevó a cabo Heinrich Hertz (1857-1894), quien demostró que tanto efectos electromagnéticos como calor radiante y luz se transmitían a través de un mismo medio (y problemático) mediante perturbaciones (ondas).

Capítulo 12

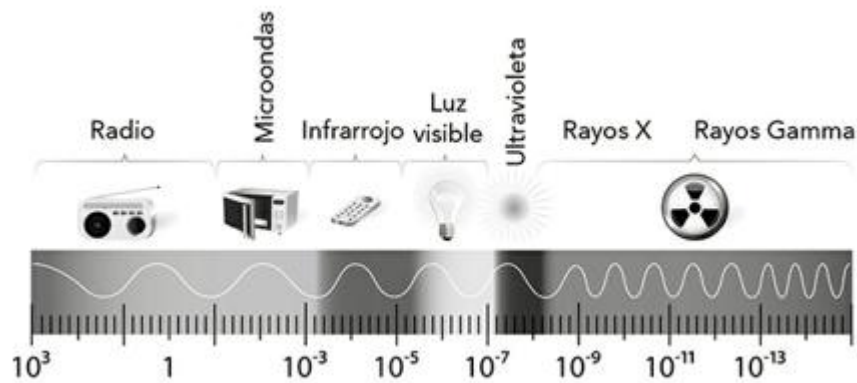
Radiaciones, energías invisibles

Contenido:

- §1. La espectroscopia*
- §2. Rayos catódicos y rayos X*
- §3. La radiactividad*
- §4. Transmutación de elementos*
- §5. Radiactividad artificial*

Hasta ahora, en nuestro recorrido por la naturaleza y las ciencias que la estudian, han sido los cuerpos materiales, eso que llamamos «materia», los que han ocupado la mayor parte de nuestra exposición; las grandes excepciones han sido los capítulos dedicados al calor, al magnetismo y la electricidad, y a la luz. Con la formulación teórica de la electrodinámica producida por Maxwell esa situación cambió, pues pudo verse a través de ella la existencia de un nuevo tipo de ente, el campo electromagnético, dotado de entidad física (posee energía). Vimos en el capítulo precedente que Maxwell descubrió que la luz no es sino una variación, una onda, de ese campo electromagnético; de esta manera, el campo electromagnético, el vehículo de la interacción electromagnética, amplió el número de entidades, de fenómenos, que pueblan el Universo, mostrándonos que vivimos rodeados de formas de energía visibles o, la mayoría, invisibles para el ojo humano, aunque las sentimos en nuestros cuerpos. Si bien los humanos somos especialmente sensibles a la luz, con la que vemos, ésta sólo corresponde, efectivamente, a una parte del conjunto de ondas que componen el denominado «espectro electromagnético»: las ondas cuya longitud se encuentra, aproximadamente, en el rango que va de 10^{-6} a 10^{-5} m, o con mayor precisión y expresado en nanómetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-9}$ m), entre $400 \mu\text{m}$ (correspondiente a la luz violeta) y $750 \mu\text{m}$ (luz roja). Junto a este tipo de radiación electromagnética existen otras: rayos gamma, rayos X, ultravioleta, infrarroja, microondas...

Estrechamente relacionadas con las ondas del campo electromagnético — confundándose de hecho con ellas, al ser de la misma naturaleza— se encuentran otras ondas, que el propio Maxwell aventuró teóricamente y cuya existencia, como también vimos, Hertz demostró de modo experimental: cuando una carga eléctrica experimenta una aceleración, una parte del campo electromagnético asociado a ella se separa de él; esto es, la carga emite una onda electromagnética que se propaga por el espacio transportando energía. A estas ondas electromagnéticas que emanan de una fuente transportando energía se las denomina «radiación electromagnética» (el término «radiación» procede del latín *radius*, que designaba a las piezas que mantienen la curvatura de una rueda. La idea, el sentido figurado, es que el Sol —y por extensión el calor del fuego— emitía radiaciones que emanan de su centro como los radios de una rueda).



Espectro de la radiación electromagnética

El que únicamente seamos capaces de ver un rango muy estrecho de las radiaciones electromagnéticas que inundan la naturaleza constituye una fuerte limitación para su estudio. La astrofísica, en particular, dio un salto cualitativo y cuantitativo sustancial cuando dejó de basarse sólo en telescopios ópticos y recurrió a instrumentos que podían detectar otros tipos de radiación. De hecho, todos los cuerpos, aunque su temperatura sea muy baja, emiten alguna radiación; como tienen algún grado de calor, la agitación térmica que esa energía calorífica produce

en las moléculas que los constituyen —moléculas que contienen cargas eléctricas—, emite energía en forma de radiación electromagnética, llamada «energía térmica».

Principales tipos de radiación electromagnética
(en metros)

Rayos gamma	$10^{-13} - 10^{-9}$
Rayos X	$10^{-11} - 10^{-8}$
Rayos ultravioleta	$10^{-8} - 10^{-6}$
Visible	$10^{-6} - 10^{-5}$
Infrarrojo	$10^{-6} - 10^{-3}$
Ondas hertzianas mayores	10^{-4}
Microondas	$10^{-3} - 10^{-1}$
Frecuencia modulada	$10 - 10^2$
Radiofrecuencia	$10^5 - 10^6$

§1. La espectroscopía

La descomposición de la luz solar descubierta por Newton mostró una banda de colores, del rojo al violeta, a la que denominó «espectro». Durante el siglo que siguió a las observaciones ópticas que Newton realizó con prismas, pocos avances importantes se produjeron en este campo. Uno de ellos tuvo lugar en 1752, cuando Thomas Melvill se aprovechó de que, al calentar los cuerpos sólidos (y los líquidos también), éstos emiten, cuando alcanzan una temperatura suficientemente alta, radiaciones. Melvill hizo pasar por un prisma la luz emitida por una llama producida por sodio; observó un espectro continuo, surcado por una serie de líneas brillantes. Que sepamos, fue la primera observación de un espectro de emisión.

Poco menos de medio siglo después de los trabajos de Melvill, justo cuando el siglo XVIII dejaba paso al XIX, William Herschel publicó una serie de artículos en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society en los que daba cuenta de unos experimentos que había realizado con lentes oscurecidas para reducir la intensidad de la luz que llegaba del Sol. Siendo como era un innovador tecnológico, comenzó

a probar con lentes coloreadas —esto es, con filtros— para observar mejor el astro. De esta manera descubrió que, mientras que una lente de color rojo detenía mucha de la luz que llegaba del Sol, dejaba en el ojo una intolerable sensación de calor. Cuando ponía un termómetro en lugar del ojo, el instrumento mostraba un importante aumento inmediato de temperatura. Lo apartó enseguida, temeroso de que la expansión del mercurio lo rompiera. Por el contrario, una lente de color verde reducía la temperatura, pero dejaba pasar demasiada luz.

Por entonces se pensaba que los diferentes colores producían iguales cantidades de calor. Las investigaciones de Herschel con lentes de diferentes colores demostraron que esto no era cierto. Imitando lo que había hecho Newton en el siglo XVII, colocó un prisma en el agujero de una ventana dirigiendo el espectro de colores que se producía hacia una tabla que podía pivotar y en la que hizo un agujero de cierta amplitud. Debajo de la tabla puso tres termómetros y, maniobrando, pudo variar el color que llegaba a través del agujero a la ampolla que contenía el mercurio. Operando con los diferentes colores, del azul al amarillo y de éste al naranja, anotó las variaciones de temperatura que se producían en cada caso en los termómetros. Cuando llegó a la luz roja, la temperatura seguía subiendo. No había duda de que el rojo poseía mayores poderes caloríficos que los otros colores.

El 27 de marzo de 1800, Herschel hizo el primer anuncio de sus sorprendentes resultados en la Royal Society, al que siguieron tres comunicaciones más en las siguientes semanas (el título del tercer artículo, publicado en 1801, es expresivo: «Observaciones tendentes a investigar la naturaleza del Sol, para hallar las causas de los síntomas de su emisión variable de luz y calor; con comentarios sobre el uso que tal vez puede hacerse de las observaciones solares»). Ahora bien, como temía, nadie pareció creer en sus resultados, que algunos trataron como poco más que las elucubraciones de un loco. En un artículo que publicó en el *Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts*, un tal Mr. Leslie manifestaba que Herschel había cometido el error de principiante de registrar únicamente el aumento de temperatura de la habitación en la que había realizado sus observaciones. Era demasiado pronto para contribuciones como la de Herschel.

El siguiente paso en lo que podemos denominar etapa preespectroscópica, se produjo muy poco después, en 1802, cuando, utilizando también prismas, aunque sin hacer pasar la luz a través de un agujero, como había hecho Newton, sino a través de una franja rectangular, William Hyde Wollaston, un médico inglés retirado que financiaba sus amplios intereses científicos gracias a su descubrimiento de un método para trabajar el platino, advirtió que en el espectro de la luz procedente del Sol aparecían unas pocas líneas oscuras, que Newton no había detectado y que él tomó como los bordes de los colores naturales. Designó, por ejemplo, con las letras *A* y *B* las líneas que marcaban la frontera del rojo, mientras que *D* y *E* separaban al violeta del azul. Por primera vez alguien había observado una estructura interna en el espectro luminoso, aparte de la secuencia de colores del arco iris. Y todo gracias a la mejora en la calidad de los cristales del prisma y a haber hecho pasar la luz por una abertura rectangular muy estrecha.

Esta misma línea de investigación, aunque introduciendo dos mejoras importantes, la utilización de un telescopio para examinar el espectro y de un teodolito para medir con precisión las posiciones de las líneas, fue la que siguió Joseph Fraunhofer (1787-1826), un óptico profesional y constructor de instrumentos, entre cuyas ocupaciones figuraba la de construir lentes; de hecho, fabricó las mejores lentes acromáticas y prismas que había visto jamás la comunidad óptica. Su interés por el espectro solar provenía de su profesión: necesitaba localizar en el espectro un punto de referencia que le permitiera medir con precisión los índices de refracción (grado de desviación de la luz al pasar por un cierto medio) de los materiales con los que construía las lentes de sus instrumentos ópticos.

Con semejantes materiales, en 1814 Fraunhofer fue capaz de distinguir en la luz procedente del Sol una gran cantidad de líneas oscuras. No encontró explicación de su presencia, pero midió con precisión la longitud de onda de más de la mitad de ellas e identificó las más destacadas con letras: de *A* a *H* y *a* y *b*; sólo entre *B* y *H* detectó 574 líneas, aunque en el mapa que publicó únicamente mostró 350. Y no se ocupó sólo de medir sus posiciones, sino también sus intensidades relativas.

Gradualmente se fue descubriendo que era posible producir líneas oscuras en los

espectros haciendo pasar la luz a través de diversas sustancias coloreadas, confirmándose por otra parte el tipo de observación de Melvill: los espectros producidos por algunas llamas estaban atravesados por líneas brillantes. Pero los aparatos utilizados por todos estos investigadores no habían sido unificados en un solo instrumento, estaban integrados por un conjunto de elementos dispersos (una abertura, una mesa con prismas, un telescopio acromático, un teodolito, acaso una lente colimadora). La unificación de todos estos componentes en una estructura común organizada fue obra de la colaboración de dos destacados científicos que se reunieron en la Universidad de Heidelberg: el físico Gustav Robert Kirchhoff y el químico Robert Wilhelm Bunsen, con los que ya nos hemos encontrado.

En el otoño de 1859 Kirchhoff realizó una sorprendente observación. Se sabía (Foucault, 1849) que las denominadas líneas D (oscuras), observadas en el espectro solar por Fraunhofer en 1814, coincidían con las líneas amarillas brillantes detectadas en las llamas que contenían sodio. Este efecto se podía observar con cierta facilidad haciendo que la luz del Sol llegase a un espectroscopio. Explicado brevemente, este aparato está constituido por un colimador que recibía los rayos de luz que llegaban, produciendo un haz paralelo que se descomponía en los diferentes colores al pasar a continuación por uno o varios prismas de cristal o por una red de difracción (una placa de cristal o de metal rayada con líneas paralelas muy próximas entre sí), montados sobre una pieza giratoria (al girar esta pieza, cada uno de los colores/rayas espectrales constituyentes del haz podía ser visto a través del ocular, con lo que era posible calcular las correspondientes longitudes de onda). Con este instrumento se observaba un conjunto de líneas, que constituye el espectro del elemento químico o sustancia analizado.

Volviendo a las observaciones astronómicas de Kirchhoff, lo que hizo fue debilitar la luz solar, logrando así que las líneas oscuras de Fraunhofer fuesen sustituidas por las líneas brillantes provenientes de la llama. El hallazgo fue advertir que, si la intensidad del espectro solar aumentaba por encima de un cierto límite, las oscuras líneas D se hacían todavía más oscuras al interponer una llama de sodio. Intuyó inmediatamente que se trataba de algo fundamental, aunque no sabía cómo explicar

el fenómeno.

Un día después se le ocurrió una explicación, que pronto se vio confirmada por nuevos experimentos: una sustancia capaz de emitir una cierta línea espectral posee una gran capacidad de absorber la misma línea, por eso las líneas *D*, características del sodio, se hacían más oscuras cuando se interponía una llama también de sodio. Otra manifestación de semejante propiedad podía ser que la simple interposición de una llama de sodio de baja temperatura sería suficiente para producir artificialmente las líneas *D* en el espectro de una fuente de luz intensa que no las mostraba inicialmente, pero este hecho conducía a una conclusión fundamental: las líneas *D* (oscuras, insisto) que aparecían en el espectro solar tenían que ser debidas a que en la atmósfera del Sol existía sodio, que mediante un fenómeno de absorción originaba las mencionadas líneas.

Las consecuencias de los argumentos y observaciones de Kirchhoff eran evidentes. Se hacía posible estudiar por primera vez la composición de los cuerpos celestes sin más que analizar la luz que recibimos de ellos. En otras palabras: nacía una nueva ciencia, la astrofísica, que permitía abordar cuestiones imposibles de resolver para la vieja, varias veces milenaria, astronomía. Ahora bien, también era posible utilizar el método espectrográfico para descubrir nuevos elementos químicos. Así lo señalaban Bunsen y Kirchhoff en uno de los artículos que publicaron en 1861:

Tenemos la convicción de que este método, que ensancha de un modo tan extraordinario los límites del análisis químico, podrá conducir a descubrir nuevos elementos desapercibidos hasta ahora por los químicos, bien por hallarse diseminados, bien por su analogía con las sustancias conocidas, bien por razón de lo imperfectos que son nuestros métodos de investigación, que no permiten encontrar entre ellos reacciones características. Desde el primer paso que hemos dado en esta senda, hemos visto realizarse lo que habíamos previsto; en efecto, bien pronto hemos reconocido, además del potasio, del sodio y del litio, la existencia de otros dos metales alcalinos, aunque las sales de estos nuevos elementos producen los mismos precipitados que las del potasio, y que solo se encuentran en pequeñísima

cantidad.

Se trataba del cesio y el rubidio. Durante los años siguientes otros elementos serían identificados mediante el análisis espectral: el talio (William Crookes, 1861), el indio (Reich y Richter, 1863), el helio (detectado por Norman Lockyer en 1869 en las protuberancias solares, descubrimiento que fue confirmado en 1895, en el laboratorio, por William Ramsay [1852-1916] y lord Rayleigh), el galio (Paul Lecoq de Boisbaudran, 1875), el escandio (Lars Nilson, 1879) y el germanio (Clemens Winkler, 1886).

El mismo año (1859) en que Kirchhoff publicó sus apreciaciones e ideas sobre las líneas *D* observadas en el espectro solar que coincidían con las líneas amarillas brillantes emitidas por llamas que contenían sodio, apareció un segundo trabajo suyo en el que se ocupaba de aspectos teóricos subyacentes en el primero. En particular, trataba en él de una propiedad específica de los cuerpos que emitían luz y calor («luz invisible», como llamaba a este último): «El cociente entre la capacidad de emisión y la capacidad de absorción, e/a , común a todos los cuerpos», escribía, «es una función que depende de la longitud de onda [de la radiación emitida o absorbida] y de la temperatura».

Un año después Kirchhoff (1860) publicó un segundo artículo en el que abordaba el mismo problema con mayor detalle, suministrando además una demostración analítica más rigurosa del teorema. Fue en este trabajo en donde, al principio, introdujo la noción de «cuerpo negro». «Quiero llamar a semejante cuerpo», fueron sus palabras, «cuerpo negro perfecto, o de modo abreviado, negro».

El problema de encontrar una expresión matemática para la distribución de la energía de un cuerpo negro en función de la longitud de onda, A (o la frecuencia, ν) de la radiación y su temperatura, se convirtió en una de las cuestiones más atractivas de la física teórica que se ocupaba del estudio de la radiación. El propio Kirchhoff llegó a un resultado importante: «que la capacidad de emisión de un cuerpo negro, considerada con respecto a una longitud de onda dada, es independiente de su constitución». Utilizando este resultado, otros científicos

avanzaron por esta senda. El primero al que hay que referirse es a Josef Stefan (1835-1893), catedrático de Matemáticas Superiores y Física en la Universidad de Viena, donde también dirigía un Instituto de Física Experimental. Utilizando una cavidad esférica de paredes totalmente absorbentes (esto es, negras), llena de radiación de intensidad K mantenida a una temperatura absoluta, T , constante, Stefan realizó medidas que sugerían que la energía total de la radiación encerrada en su modelo de cuerpo negro era proporcional a la temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia (T^4). La propuesta de Stefan (que presentó en 1879) era puramente experimental, pero fue deducida teóricamente en 1884 por Ludwig Boltzmann; de ahí que se conozca como ley de Stefan-Boltzmann.

Sobre estos cimientos, Wilhelm Wien (1864-1928), un físico alemán que había estudiado en Gotinga, Heidelberg y Berlín, doctorándose con Helmholtz en 1886, avanzó una ley específica para la distribución de la energía con respecto a la frecuencia y la temperatura, $u(\nu, T)$:

$$u(\nu, T) = \alpha \times \nu^3 \times e^{(-\beta\nu/T)}$$

donde α y β eran constantes.

La ley de Wien parecía funcionar bien, pero en 1900 dos físicos que trabajaban en Charlottenburgo, en el Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Instituto Imperial de Física Técnica), el primer instituto nacional dedicado especialmente a metrología, del que Wien era miembro cuando presentó su ley, Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum, demostraron que esta ley no era correcta para frecuencias cortas (longitudes de onda grandes). Semejante información sería decisiva para que un catedrático de Física de la cercana Universidad de Berlín, de nombre Max Planck, propusiera otra ley para la radiación de un cuerpo negro, con la que comenzó la historia de la física cuántica.

§2. Rayos catódicos y rayos X

En 1709, Francis Hauksbee el Viejo, *curator* (conservador) de experimentos y

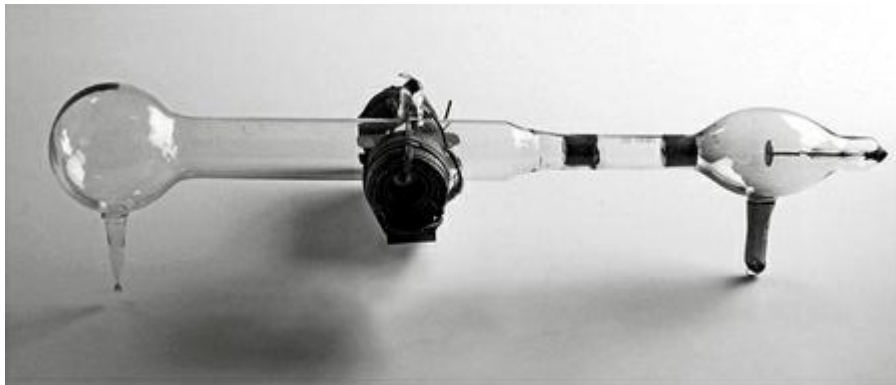
constructor de instrumentos para la Royal Society de Londres, publicaba un libro titulado *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects* donde aseguraba haber observado que, si se agitaba un recipiente de vidrio en el que previamente se había extraído el aire e introducido algunas gotas de mercurio, aparecía un resplandor fosforescente. De hecho, las experiencias de Hauksbee fueron estimuladas por fenómenos parecidos detectados con anterioridad en los tubos barométricos (en los que se había generado algún vacío) de Evangelista Torricelli, a los que ya hicimos referencia. En 1675, por ejemplo, el astrónomo Jean Picard advirtió, en la oscuridad de su observatorio de París, que cuando movía barómetros a veces se producía un misterioso halo luminoso por encima del nivel de la columna oscilante de mercurio.

Para que Hauskbee pudiera llevar a cabo estos experimentos, fue esencial disponer de una bomba de vacío, un aparato que había desarrollado —como ya señalamos— en especial Otto von Guericke hacia 1647. Sin embargo, poco importante sucedió hasta la centuria siguiente. Hubo que esperar, en efecto, a disponer de mejores bombas de vacío, dominio en el que destacó Heinrich Geissler, un mecánico y experto soplador de vidrio de Bonn, extremadamente habilidoso en la construcción de instrumentos científicos. Con su nueva bomba, que utilizaba mercurio y que construyó hacia 1855, Geissler extraía con gran eficacia aire de tubos de vidrio en cuyos extremos introducía electrodos, a los que aplicaba elevados voltajes eléctricos, obteniendo efectos luminosos de gran belleza (los colores variaban según el gas utilizado).

En el siglo de la electricidad, no es sorprendente que semejante dispositivo experimental fuese empleado también por físicos y químicos para estudiar las características de los gases utilizados, así como la relación existente entre gas y electricidad. Uno de estos científicos fue Julius Plücker, quien en 1858, durante sus investigaciones espectroscópicas, encontró que, a medida que se iba extrayendo el gas del tubo, la luminosidad que lo llenaba en un principio (producida por la diferencia de potencial existente entre los electrodos) disminuía progresivamente hasta que el cátodo aparecía rodeado por una delgada envoltura luminosa, de color

variable dependiendo de la naturaleza del gas introducido en el tubo, y separada del cátodo por un espacio oscuro, tanto más extenso cuanto mayor era el enrarecimiento de la atmósfera interior. Cuando la presión del gas disminuía a una millonésima de atmósfera, el espacio oscuro invadía todo el tubo, no observándose otra cosa que un pequeño círculo de luz violeta en el extremo del cátodo, a la vez que el vidrio adquiría una intensa fosforescencia en la parte opuesta.

Tras los trabajos de Plücker, un alumno suyo, Wilhelm Hittorf, y Eugen Goldstein demostraron (el primero con un cátodo en forma de punta) que un objeto colocado en la línea del cátodo daba lugar a una sombra bien definida en la envoltura luminosa, lo que sugería que lo que emanaba eran rayos que viajaban en línea recta desde el cátodo. De ahí que se terminase pasando de hablar de «emisión catódica» a utilizar la expresión, introducida en 1876 por Goldstein, *Kathodenstrahlen*, «rayos catódicos» (Hittorf empleó el término *Glimmstrahlen*).



Tubo de rayos catódicos

Qué eran en realidad esos *Kathodenstrahlen* fue una pregunta que tardó en ser contestada. Como veremos más adelante, la respuesta llegó en 1897 de la mano del director del laboratorio Cavendish de Cambridge, Joseph John Thomson, quien demostró que en realidad consistían en corrientes de partículas cargadas, de electrones.

Uno de los físicos que se dedicaron a estudiar los rayos catódicos, antes incluso de que Thomson dilucidara su estructura, fue Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923).

En junio de 1894, Röntgen, catedrático desde 1888 en la Universidad de Wurzburg, comenzó a trabajar en lo que para él era entonces un nuevo campo de investigación: el de los rayos catódicos. En el curso de sus investigaciones, el 8 de noviembre de 1895, encontró una nueva y misteriosa —podía atravesar cuerpos opacos— radiación, a la que bautizó como «rayos X», ya que ignoraba su naturaleza. En una entrevista que concedió a un periodista, Röntgen dio algunos datos relacionados con su descubrimiento, que merece la pena reproducir:

No hacía mucho que había comenzado con mis ensayos, cuando observé algo nuevo. Trabajaba con un tubo de Hittorf-Crook envuelto completamente en un papel negro. Sobre la mesa, al lado, estaba colocado un trozo de papel indicador de platinocianuro de bario. Hice pasar a través del tubo una corriente y noté una curiosa línea transversal sobre el papel [...]. El efecto era tal que, con arreglo a las ideas de entonces, solamente podía resultar de la radiación de la luz. Pero era totalmente imposible que la luz proviniera de la lámpara, puesto que, indudablemente, el papel que la envolvía no dejaba pasar luz alguna, ni siquiera la de una lámpara de arco.

El 28 de diciembre, Röntgen presentó el manuscrito de la primera de las tres comunicaciones que preparó para la Sociedad Física y Médica de Wurzburg: «Sobre un nuevo tipo de rayos».

El 1 de enero de 1896 ya disponía de separatas, que envió, junto a copias de fotografías que había obtenido —algunas de las cuales se harían famosas; en especial la de la mano de su esposa, tomada el 22 de diciembre—, a los principales científicos europeos. El segundo artículo vio la luz en marzo de 1896, incluyendo esta vez una fotografía de la radiografía de una mano.

Al igual que ocurría con los rayos catódicos, la naturaleza de los rayos X fue intensamente debatida desde el principio. La mayor parte de los físicos pensaba que eran algún tipo de radiación electromagnética, opinión que el propio Röntgen compartía. Sin embargo, existían evidencias que apuntaban al hecho de que no se comportaban como los rayos de luz ordinaria. La solución al problema de la

naturaleza de los rayos X tardaría más de una década en llegar. Lo hizo en 1912, cuando el 21 de abril y en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Múnich, Walter Friedrich y Paul Knipping observaron, siguiendo una propuesta de un antiguo doctorando de Planck, Max von Laue (1879-1960), la difracción de rayos X por un cristal. La idea de que un cristal estaba formado por moléculas o átomos distribuidos a lo largo y ancho de una red espacial era por entonces ampliamente conocida y aceptada, de manera que la contribución auténticamente original fue asociar experimentalmente estas estructuras cristalinas con los rayos X para clarificar así la naturaleza de ambos. Si los rayos X eran ondas electromagnéticas de longitud de onda pequeña, y si los cristales estaban formados por átomos distribuidos de manera regular en el espacio, con distancias pequeñas entre ellos, entonces, al ser los tamaños implicados similares, debían producirse interferencias al hacer incidir los rayos sobre el cristal. Midiendo distancias entre los máximos de intensidad en el diagrama de interferencia, sería posible calcular, como se hacía en la óptica ordinaria, la longitud de onda de los rayos X. Esto es lo que se hizo: se irradió con rayos X un cristal de sulfato de cobre, obteniéndose puntos negros distribuidos periódicamente en una placa fotográfica colocada detrás del cristal.

Como los átomos que forman los cristales no son todos iguales, era inmediato pensar que la difracción de rayos X podría utilizarse no sólo para determinar las distancias entre los átomos que forman el cristal, sino también para establecer sus diferentes componentes atómicos. Sin embargo, el método de Laue, que utilizaba el espectro continuo de rayos X, es decir, rayos X de diferentes longitudes de onda, no era el más adecuado para llevar a cabo semejante programa, ya que, por ejemplo, cada longitud de onda provoca una difusión diferente en el cristal, con lo cual se tienen múltiples procesos de difusión. Una solución más conveniente surgió de la colaboración de William Henry Bragg y William Lawrence Bragg, padre e hijo, *professor* en la Universidad de Leeds y estudiante en el laboratorio Cavendish de Cambridge, respectivamente, que desarrollaron unas técnicas que les permitieron determinar en 1913 la estructura del diamante. Antes de que comenzara la Primera

Guerra Mundial el joven Bragg determinaba otras estructuras: CaF_2 (fluorita), FeS_2 (pirita) y CaCO_2 (calcita).

§3. La radiactividad

Las noticias del descubrimiento de los rayos X circularon con rapidez por todo el mundo, y no sólo en ámbitos científicos. Las evidentes aplicaciones médicas de la nueva radiación contribuyeron mucho a la popularidad que enseguida adquirieron (antes de un año algunos hospitales ofrecieron servicios de radiología). En Francia la noticia también se conoció pronto, en los periódicos al igual que en instituciones como la prestigiosa *Académie des Sciences*, que dedicó su reunión del 20 de enero de 1896 a estudiar el tema. En esta sesión, dos médicos, Oudin y Barthélemy, presentaron una fotografía que habían tomado de los huesos de una mano utilizando rayos X. El matemático Henri Poincaré, que había recibido del propio Röntgen copias de algunas de sus fotografías, fue el encargado de hacer la presentación en aquella sesión de la Academia, a la que también llevó un ejemplar del artículo de Röntgen. Llamó entonces la atención sobre la posible conexión entre los rayos X y la fluorescencia.

Uno de los que asistieron a la sesión de la Academia de Ciencias del 20 de enero fue Henri Becquerel (1852-1908), catedrático de Física en el Museo de Historia Natural de París. Interesado por las noticias que se comunicaron allí sobre los hallazgos de Röntgen, y disponiendo como disponía en el museo de sales de uranio que mostraban propiedades fosforescentes, recurrió a ellas para ver si producían rayos X. El 24 de febrero, poco más de un mes después de la reunión de la Academia, y casi cuatro del descubrimiento de Röntgen, Becquerel presentó a la Académie una primera comunicación, «Sobre las radiaciones emitidas por fosforescencia», en la que sostenía que los rayos emitidos por el sulfato doble de uranio y potasio, una sustancia fosforescente, impresionaban, a través de una espesa envoltura de papel, una placa fotográfica. Parecía, efectivamente, que la fosforescencia iba acompañada de rayos X. Sin embargo, una semana más tarde, el 2 de marzo, la Académie recibía otra comunicación de Becquerel, esta vez con un

contenido mucho más sorprendente. El día 26 de febrero se había visto obligado a interrumpir sus experiencias con las sales de uranio debido a que estaba nublado y no salió el sol. Como tenía la placa fotográfica protegida por una envoltura y la sal de uranio preparada, las guardó en un cajón, esperando que el día siguiente saliese el sol y pudiese exponer la sal a su luz. Como el tiempo no cambió en varios días, el 1 de marzo Becquerel optó por revelar la placa fotográfica, esperando encontrar imágenes débiles. Sorprendentemente, encontró siluetas muy fuertes. Sin la intervención de la luz solar, sin ninguna fosforescencia o fluorescencia visible, el compuesto de uranio había emitido una radiación capaz de impresionar la placa. Por qué era algo que Becquerel desconocía.

En la siguiente sesión de la Academia, celebrada el 9 de marzo, Becquerel informaba de que, además de oscurecer placas fotográficas, la nueva radiación ionizaba los gases, haciéndolos conductores; un hallazgo que permitía determinar, recurriendo a un instrumento que midiese corrientes eléctricas, la «actividad» de una muestra. También indicaba que por entonces había mantenido sus cristales en la oscuridad durante 160 horas, sin que se produjese ningún debilitamiento en la radiación que emitían. Asimismo, había reducido la lista de sustancias que emitían la nueva radiación a únicamente compuestos de uranio, con dos sorprendentes excepciones: un par de especímenes de sulfato de calcio, que por alguna razón que aún hoy se ignora producían imágenes a través de 2 mm de aluminio.

Todos estos resultados forman en realidad la esencia del descubrimiento de la radiactividad. Becquerel continuó estudiando las propiedades de la nueva radiación, publicando más notas en las *Comptes Rendus* del 23 y 30 de marzo, pero la esencia del descubrimiento estaba completa. Todos los resultados que obtenía le inducían a pensar que las emisiones procedían del uranio: «Todas las sales de uranio que he estudiado», escribía en una de sus notas, «ya sean fosforescentes o no con respecto a la luz, estén cristalizadas, fundidas o en solución, han dado resultados comparables. Esto me ha conducido a pensar que el efecto es debido a la presencia en estas sales del elemento uranio, y que el metal daría efectos más intensos que los compuestos». Comprobó, asimismo, que la actividad de las muestras no se

debilitaba aunque transcurriera mucho tiempo: «Desde el 3 de marzo al 3 de mayo, estas sustancias se mantuvieron encerradas en un caja de cartón opaco. Desde el 3 de mayo, han sido colocadas en una doble caja de plomo que nunca abandona la cámara oscura [...]. Bajo estas condiciones, las sustancias continúan emitiendo radiaciones activas». Y no sabía explicar el porqué de este sorprendente fenómeno, al que se refirió como un «tipo de fosforescencia invisible».

A pesar de lo que estemos tentados a pensar más de un siglo después, en su momento el descubrimiento de Becquerel no atrajo excesiva atención; los rayos X seguían en la cresta de la ola de la popularidad. La persona responsable de que todo esto cambiase fue una mujer de origen polaco, Marie Sklodowska-Curie (1867-1934).



Marie Curie en su laboratorio

Una vez licenciada en Física y Matemática por la Sorbona, y casada con Pierre Curie (1859-1906), entonces profesor de Física en la *École Municipale de Physique et de Chimie Industrielles* de la ciudad de París, Marie Curie decidió doctorarse, y no encontró mejor tema que el de estudiar un fenómeno descubierto no hacía mucho por Henri Becquerel. El primer fruto de aquel interés fue un breve artículo

publicado en 1898 en los *Comptes Rendus*, titulado «Rayos emitidos por los compuestos de uranio y del torio». Para sus experimentos, Marie utilizó un húmedo y frío cobertizo de ladrillo y cristal destinado a servir de lugar de almacenaje para la escuela en la que trabajaba Pierre.

Lo que hizo Marie Curie en aquellas sus primeras investigaciones en el campo de la radiactividad fue, por un lado, estudiar la conductividad del aire bajo la influencia de la radiación emitida por el uranio, descubierta por Becquerel, y, por otra parte, buscar si existían otras sustancias, aparte de los compuestos del uranio, que convirtiesen el aire en conductor de la electricidad. El procedimiento experimental era, en principio, sencillo: colocaba el material a estudiar sobre una placa metálica frente a la que se encontraba otra placa, también de metal, que hacía las veces de condensador; utilizaba entonces el electrómetro de cuarzo piezoeléctrico (desarrollado por su esposo, que se basaba en la piezoelectricidad, fenómeno que consiste en una polarización eléctrica producida por la compresión o expansión de cristales en la dirección del eje de simetría) para comprobar si pasaba alguna corriente eléctrica por el aire existente entre las placas. Cuanto mayor fuese la intensidad de esa corriente, mayor la actividad radiactiva de la sustancia.

En sus experimentos, Marie se había encontrado con una sustancia especialmente llamativa: «de los minerales que se han mostrado activos, todos contienen elementos activos. Dos minerales de uranio: la pechblenda (óxido de uranio) y la calcolita (fosfato de cobre y de uranio) son mucho más activos que el propio uranio. Este hecho es muy sorprendente e induce a creer que estos minerales pueden contener un elemento mucho más activo que el uranio». Había que intentar aislar el o los elementos que creía haber detectado indirectamente en esos minerales. Con la colaboración de Pierre, tras tres meses de trabajo, anunciaron la existencia de un nuevo elemento químico: el polonio. En efecto, fue el 18 de julio de 1898 cuando presentaban en la *Académie des Sciences* su artículo «Sobre una nueva sustancia radiactiva, contenida en la pechblenda». Es, por cierto, la primera vez que se utilizó la expresión «radiactiva»; esto es, activa en radiación, que emite radiaciones. Marie y Pierre introducían un término, «radiactividad».

Durante las investigaciones que les condujeron al descubrimiento del polonio, el matrimonio Curie halló indicios de que, acompañando al bario separado de la pechblenda, podía existir otro elemento. Pero, para continuar avanzando, los Curie pensaron que necesitaban más conocimientos y habilidades químicas que las que ellos poseían, y en consecuencia solicitaron la ayuda de Gustave Bémont (1857-1932), un químico que entonces era jefe de los trabajos de química mineralógica en la *École de Physique et Chimie Industrielles*. Después de varios meses, fueron capaces de separar ese segundo nuevo elemento, al que denominaron «radio», que luego demostró ser más importante que el polonio y mucho más difícil de obtener. Tras cuatro años de duro trabajo, los Curie sólo pudieron separar 100 mg de elemento bastante puro, a partir de varias toneladas de mena de uranio. No es extraño, por consiguiente, que su precio fuese muy elevado: en 1921, por ejemplo, un gramo de radio costaba 100.000 dólares. Sin embargo, sus características justificaban semejante valor. Su vida media (el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de átomos de una muestra, básicamente también el tiempo que tarda en disminuir a la mitad la actividad de esa muestra) es de 1.600 años, frente a los sólo 138 días del polonio y los 4.500 M. a. del uranio. El radio es, por tanto, una fuente de radiación estable durante cientos de años, y tiene, además, una intensidad 3.000 veces superior a la de una cantidad igual de uranio. En otras palabras, combina una vida larga y una intensidad elevada mucho mejor que cualquier otro elemento o sustancia radiactiva.

Para los pioneros de la radiactividad, al igual que para todos aquellos que se interesaban de una u otra manera por ella, se trataba de un fenómeno sorprendente, inexplicable sobre la base de la física y la química conocidas entonces. Era inevitable que los científicos de la época se preguntasen cuál era su origen y, en consecuencia, que se produjeran todo tipo de reacciones.

Sin entrar en un análisis general, es posible identificar tres fases en la historia de la explicación de la radiactividad. La primera duró hasta 1903, y en ella la principal cuestión tratada fue si la radiactividad era una propiedad atómica de la materia o si, por el contrario, era producida por un agente externo. Aquel periodo terminó con la

aceptación general de que la primera posibilidad, la de que se trataba de un fenómeno atómico, era la correcta, aunque no por ello dejase de considerarse ocasionalmente la segunda opción. La siguiente fase cubre, aproximadamente, la década de 1903 a 1913, y en ella el objetivo más perseguido fue encontrar algún modelo atómico que pudiese explicar la radiactividad. Los continuos fracasos en este sentido terminaron por producir un ambiente científico en el que la cuestión del origen de la radiactividad dejó de plantearse —o por lo menos de plantearse con la frecuencia, convicción e intensidad de antes—, convenciéndose la mayoría de los físicos (no todos, por supuesto) de que la respuesta llegaría en el futuro, cuando se dispusiese de esquemas conceptuales, de teorías, más poderosos. La mecánica cuántica (de la que trataremos en el capítulo 21) sería semejante «esquema conceptual»: en 1928, George Gamow y, de manera independiente, Ronald Gurney y Edward Condon demostraron que la física cuántica suministraba una explicación satisfactoria, aunque no totalmente completa, de las emisiones radiactivas. Antes, eso sí, ayudó a iniciar el camino de comprensión de la naturaleza de la radiactividad una contribución de un entonces joven y desconocido empleado de la Oficina de Patentes de Berna, al que ya nos hemos referido, de nombre Albert Einstein, publicada en 1905: el artículo que contiene la célebre ecuación $E = m \times c^2$.

§4. Transmutación de elementos

Uno de los primeros investigadores que se ocuparon de la radiactividad fue un joven neozelandés llamado Ernest Rutherford (1871-1937), que desde septiembre de 1895 trabajaba con una beca en el laboratorio de J. J. Thomson (se había graduado en el Canterbury College de Christchurch, un pequeño centro que formaba parte de la Universidad de Nueva Zelanda). Inicialmente (1896), Rutherford colaboró con Thomson en el estudio de la ionización de gases debida a la exposición a rayos X, pero pronto, antes incluso del descubrimiento del polonio y el radio, que impulsaría los estudios radiactivos, comenzó a utilizar la nueva radiación uránica, que también ionizaba los gases, con el propósito de estudiar su

composición. Su primera publicación en este campo apareció en 1899 en el *Philosophical Magazine*, cuando ya había abandonado Cambridge por la Universidad McGill de Montreal, en donde obtuvo su primera cátedra, *McDonald Professor* de Física, si bien los experimentos que resumía los había llevado a cabo todavía en el laboratorio Cavendish.

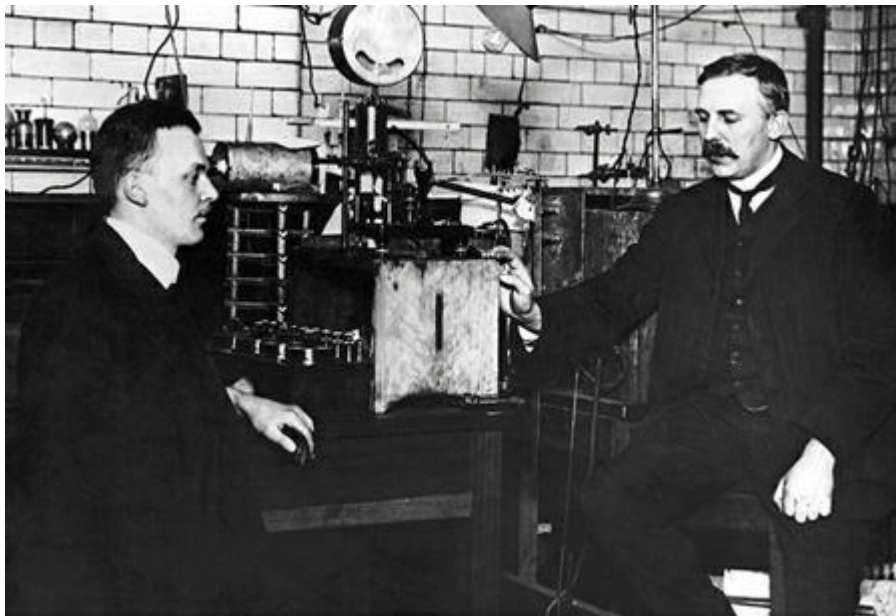
En aquel su primer artículo relacionado con la radiactividad, Rutherford explicaba que los experimentos que había realizado demostraban «que la radiación del uranio es compleja, y que al menos están presentes dos tipos distintos de radiación, una que es absorbida muy fácilmente, que por conveniencia será denominada radiación α , y la otra de un carácter mucho más penetrante, que será denominada radiación β ». Se dio cuenta de este hecho viendo que se obtenía una radiación (la β) de la misma intensidad e igual poder de penetración, tras haber eliminado una parte (la α) de la radiación inicial del uranio mediante hojas delgadas de aluminio, papel de estaño o papel.

Además de los dos tipos de radiación identificadas por Rutherford, existía una tercera, la γ , muy penetrante (aproximadamente 160 veces más que la β), que fue detectada por primera vez poco después, en 1900, por el francés Paul Villard en investigaciones que llevó a cabo en el laboratorio de química de la *École Normale* de París. En cuanto a su naturaleza, él mismo se dio cuenta de que no podía estar formada por rayos catódicos, ya que no se desviaba en un campo magnético. Fue, no obstante, Rutherford, en colaboración con Edward Nevelle da Costa Andrade, quien obtuvo en 1913-1914 la evidencia definitiva de que la radiación γ es en realidad radiación electromagnética de frecuencia en el rango de 10^{-14} a 10^{-10} m, bastante similar, por tanto, a los rayos X, pero con mayor energía. Se comprobó, asimismo, que estas radiaciones no eran exclusivas del uranio, sino que estaban presentes en todas las sustancias radiactivas conocidas: polonio, radio y torio.

En cuanto a la naturaleza de las radiaciones α y β , la β fue la primera en ser explicada (Becquerel en 1900 y Walter Kaufmann en 1901) como corriente de electrones; al fin y al cabo ya se tenía experiencia en este tipo de investigaciones tras los trabajos de Thomson con rayos catódicos. Y fue el propio Rutherford quien

terminó demostrando que la α estaba formada por núcleos de helio (él pensó inicialmente en átomos, no en núcleos, una distinción que tendría que esperar hasta disponer del modelo atómico que él mismo propuso en 1911).

Otro resultado importante que obtuvo Rutherford y que presentó en un artículo de 1900 fue que los «compuestos del torio emiten continuamente partículas radiactivas de algún tipo, que retienen sus poderes radiactivos durante algunos minutos. Esta “emanación”, como será denominada por brevedad, tiene la capacidad de ionizar el gas de su entorno y de atravesar capas delgadas de metales y, con gran facilidad, pasar a través de papel de un grosor considerable». Gracias al hecho de que «la corriente a través del gas disminuye en progresión geométrica con el tiempo», lo que significaba que «la intensidad de la radiación emitida por las partículas radiactivas disminuye en el tiempo según una progresión geométrica», Rutherford supo que los poderes radiactivos de esas misteriosas emanaciones, de esa radiactividad inducida, disminuían con el paso del tiempo; en lo referente a qué eran esas emanaciones, únicamente podía especular: tal vez se tratara de partículas de polvo o vapor emitido por los compuestos de torio.



Ernest Rutherford (a la derecha) en su laboratorio

Sin embargo, la realidad demostró ser diferente... y mucho más interesante. Y en este punto es preciso mencionar a Frederick Soddy (1877-1956), un químico de Oxford que en la primavera de 1900 llegó al Departamento de Química de la Universidad McGill para trabajar con Rutherford. Lo que Rutherford y Soddy demostraron es que las emanaciones radiactivas eran en realidad elementos químicos radiactivos que se habían originado a partir del elemento radiactivo progenitor. En otras palabras: que se producían transformaciones radiactivas. Así, en 1902, en uno de sus trabajos conjuntos, señalaban que al menos una parte de la emanación del torio era un gas inerte, o noble, nuevo, al que en principio se denominó «nitrón» y finalmente «radón». Y pronto, en un artículo, el primero de una serie de tres, que publicaron en el *Philosophical Magazine* con el título de «La causa y naturaleza de la radiactividad, I» afirmaban con rotundidad: «Se demuestra que la radiactividad está acompañada por cambios químicos en los que se están produciendo continuamente nuevos tipos de materia. Los productos de estas reacciones son al principio radiactivos, pero su actividad disminuye de manera regular desde el momento de su formación [...]. Se extrae la conclusión de que estos cambios químicos deben ser de carácter subatómico».

Cuando, a partir de 1904, las evidencias fueron tales que Rutherford comenzó a pensar que la radiación α estaba formada por átomos-núcleos de helio, pudo avanzarse en una teoría más completa de las transformaciones radiactivas. Si el elemento radiactivo progenitor emitía radiación α , esto significaba que perdía una masa importante, y si a esto se unía el que cambiaba su carga (debido no sólo a la carga que se llevaban los átomos de helio, sino a que también emitía radiación β , esto es, electrones), entonces la conclusión era inevitable: las emisiones asociadas a la radiactividad cambiaban al elemento radiactivo, lo transmutaban. La materia o, al menos, alguna materia ya no era estable, permanente.

Con la teoría de las transmutaciones radiactivas, el estudio de las cadenas radiactivas se convirtió en uno de los temas de investigación más atractivos. Se comprobó así, por ejemplo, que el plomo (para el que Francis Aston, inventor del espectrómetro de masas, demostró la existencia de tres isótopos, de masas atómicas

206, 207 y 208, el primero el más abundante en la naturaleza) era el producto final, no radiactivo, de la serie del uranio. Asimismo, la desintegración del radio conducía al plomo a través de media docena de productos intermedios. En el proceso de investigación de estas secuencias radiactivas, se descubrieron nuevos elementos, aunque con frecuencia al principio se producía confusión acerca de la entidad de los productos intermedios, que solían ser bautizados con nombres del tipo «emanación del torio», «torio X», «emanación del radio». En 1905, por ejemplo, Otto Hahn (1879-1968) introdujo el término «radiotorio» para un elemento intermedio que detectó, y dos años después «mesotorio», distinguiendo en éste dos productos sucesivos (I y II).

Otro resultado importante, que se puso en evidencia desde los primeros trabajos de Rutherford, fue que la actividad de los cuerpos radiactivos, medida por la radiación que emitían, disminuía con el tiempo según una progresión geométrica (Rutherford introdujo la «ley de radiactivo» $dN/dt = -\lambda N$, donde N representa el número de átomos radiactivos, t el tiempo y λ una constante). Este resultado condujo a la introducción de la ya citada —a propósito del radio— noción de «vida media», básica para la datación de los periodos geológicos y de la antigüedad de restos arqueológicos.

Mencionaremos también un resultado de gran importancia al que llegó Soddy en 1910, ya catedrático en la Universidad de Glasgow: que existen elementos de diferente peso atómico, pero con las mismas propiedades químicas. Para referirse de manera genérica a esos elementos con propiedades químicas idénticas, él mismo introdujo en 1913 un término que acabó haciendo fortuna, «isótopo»: «La misma suma algebraica de las cargas positivas y negativas en el núcleo», escribió, «cuando la suma aritmética es diferente, da lo que denominó “isótopos” [...] porque ocupan el mismo [*iso*] lugar [*topos*] en la tabla periódica».

§5. Radiactividad artificial

La radiactividad de la que hemos tratado hasta el momento era natural, aunque fuese inducida; esto es, un fenómeno natural, no forzado, que ayuda a comprender,

por cierto, la distribución de elementos en la Tierra y la cuestión de por qué algunos ya no existen en nuestro planeta. Resultó, sin embargo, que existe también una radiactividad artificial, producida mediante ciertos procesos físicos.

Fueron Irene (1897-1956) y Frédéric Joliot-Curie (1900-1958) quienes descubrieron, en 1934, la radiactividad artificial. El origen de este trascendental descubrimiento queda claro con sólo leer los dos, casi idénticos, artículos en los que Irene y Frédéric anunciaron su hallazgo, uno escrito en francés (en *Comptes Rendus*), con Irene como primer firmante y presentado el 15 de enero, y otro en inglés (en *Nature*, 10 de febrero), con Frédéric encabezando la lista de autores. Utilizaremos la versión inglesa, titulada «Producción artificial de una nueva clase de radio-elemento»:

Hace algunos meses descubrimos que ciertos elementos ligeros emiten positrones [electrones de carga positiva] bajo la acción de partículas α . Nuestros últimos experimentos han mostrado un sorprendente hecho: cuando se irradia una lámina de aluminio con una preparación de polonio, la emisión de positrones no cesa inmediatamente cuando se elimina la preparación activa. La lámina continúa siendo radiactiva y la emisión de radiación decae exponencialmente como en la radiactividad ordinaria. Observamos el mismo fenómeno con boro y magnesio [...]. No hemos observado efectos similares con hidrógeno, litio, berilio, carbono, oxígeno, flúor, sodio, silicio o fósforo. Acaso en algunos casos la vida media es demasiado breve como para observarlos fácilmente [...]. Estos experimentos dan la primera prueba química de transmutación artificial, y también la prueba de la captura de la partícula α en estas reacciones.

Los resultados obtenidos por el matrimonio Joliot-Curie fueron explotados con gran rapidez y fecundidad por Enrico Fermi (1901-1954) en Roma. Inmediatamente después de saber del descubrimiento de los Joliot-Curie, Fermi se dio cuenta de que se podría utilizar la partícula neutra (sin carga eléctrica) que James Chadwick había

descubierto en 1932, el neutrón, para intentar producir radiactividad artificial (nos ocuparemos de este descubrimiento en el capítulo 21). Al estar desprovistos de carga, podían superar la barrera de electrones que rodea a los núcleos atómicos y penetrar en ellos. Con la ayuda de sus colaboradores, Fermi llevó a cabo una investigación sistemática del comportamiento de los elementos a lo largo de toda la tabla periódica. De los 63 elementos que investigaron, 37 mostraron una actividad radiactiva inducida fácilmente detectable.

Otro de los puntos que le interesaba era ver si podía producir elementos químicos más pesados que el uranio, el tope superior entonces de la tabla periódica de los elementos. Si podía crear elementos transuránicos. Bombardeando torio y uranio con neutrones, encontró que mostraban una actividad inducida bastante fuerte. Desde el verano de 1934 intentó aislar químicamente los portadores de estas actividades, deduciendo que eran uno o más elementos con un número 93 y 94, a los que dio los nombres de «ausonio» y «hesperio». Y, más o menos, se quedó en este punto. Su trabajo había sido excelente, merecedor del Premio Nobel, que recibió en 1938, «por su demostración de la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por irradiación de neutrones y por su descubrimiento relacionado de la reacciones nucleares producidas por neutrones lentos», pero le faltó apreciar un detalle de importancia fundamental: que al ser irradiado con neutrones, el uranio se partía, se fisionaba. Fermi se había quedado a las puertas de uno de los descubrimientos más sensacionales de la historia de la física contemporánea, el de la fisión del uranio. Él estaba considerando la formación, mediante absorción de neutrones, de elementos transuránicos, más allá del uranio en la tabla periódica, sin imaginar que tal absorción podía producir la ruptura, la fisión, del núcleo del uranio. Fueron dos alemanes que trabajaban en el Instituto de Química de la Sociedad Káiser Guillermo en Berlín, Otto Hahn (1879-1968) y Fritz Strassmann (1902-1980), quienes descubrieron esa fisión.

Bombardeando uranio con neutrones lentos, Hahn y Strassmann encontraron, para su sorpresa, que obtenían bario, un elemento mucho más ligero (casi la mitad) que el uranio (el uranio tiene número atómico 92 y el bario, 56). Parecía que el núcleo

de uranio se había partido en dos, que se había fisionado. Pero jamás se había observado algo parecido; las transmutaciones atómicas descubiertas hasta entonces involucraban transformaciones de un elemento a otro cercano a él en la tabla periódica. El 6 de enero de 1939, Hahn y Strassmann publicaban el correspondiente artículo en el que manifestaban sus dudas ante sus «peculiares resultados [...]». Como químicos debemos afirmar que los nuevos productos son bario [...]. Sin embargo, como “químicos nucleares”, que trabajan muy próximos al campo de la física, no podemos decidirnos a dar un paso tan drástico que va en contra de todos los experimentos realizados anteriormente en la física nuclear. Acaso se hayan dado una serie de coincidencias poco habituales que nos han proporcionado indicaciones falsas».

Lise Meitner (1878-1968), con quien Hahn había colaborado durante 30 años (Hahn era químico, Meitner, física), pero que, debido a su origen judío, había tenido que abandonar el instituto y Alemania, y que entonces se encontraba en Estocolmo, fue la primera en enterarse. *E* interpretó correctamente los resultados desde el punto de vista de la teoría, junto a su sobrino, el también físico Otto Robert Frisch (1904-1979), exiliado en Dinamarca, donde trabajaba en el Instituto de Niels Bohr, que había ido a pasar con su tía las vacaciones de Navidad a la pequeña ciudad de Kungälv (cerca de Gotemburgo).

Pronto se comprobó, además, que en cada fisión de un núcleo de uranio (en realidad, del isótopo 235, mucho menos abundante en la naturaleza que el 238) se producía más de un neutrón, con lo que inmediatamente surgió la idea de inducir una reacción en cadena: los neutrones liberados podían colisionar con otros núcleos de uranio, liberando en cada caso energía (alrededor de 200 MeV, el equivalente energético de la pérdida de masa que se producía en la reacción; una muestra más de la realidad de la ecuación que

Einstein propuso en 1905, $E = m \times c^2$, y a la que nos referiremos más adelante) y neutrones, y así sucesivamente. De la misma manera, era posible pensar que se podría producir en fracción de segundos una gran cantidad de energía que permitiese, en el caso de una reacción en cadena más o menos incontrolada,

fabricar un arma tremendamente poderosa, o, si se pudiese controlar y liberar poco a poco, una fuente energética, un reactor («pila» se denominó inicialmente) nuclear, utilizable con fines pacíficos.

Que esta última posibilidad era factible fue algo que se comprobó el 2 de diciembre de 1942, cuando en un reactor experimental cuya construcción dirigió en Chicago Fermi, instalado ya en Estados Unidos, tuvo lugar la primera reacción en cadena de la historia; esto es, el reactor (que contenía 6 toneladas de uranio metálico y 58 de óxido de uranio, más 6 toneladas de grafito, que se utilizaba para moderar la velocidad de los neutrones) produjo tanta energía como la que necesitaba para continuar funcionando. Sin embargo, estos trabajos se llevaron a cabo dentro de un contexto muy especial: el de la Segunda Guerra Mundial; más concretamente, el del denominado Proyecto Manhattan, puesto en marcha poco después de la entrada de Estados Unidos en la contienda (diciembre de 1941). El consecuencia, el fin que perseguían las investigaciones del equipo de Fermi en Chicago no era el de suministrar energía abundante para usos civiles, sino avanzar en el conocimiento de la fisión atómica para poder fabricar bombas nucleares. El éxito de la empresa se comprobó con total claridad en agosto de 1945, cuando las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki recibieron sendas bombas nucleares (la primera de uranio y la segunda de plutonio, otro elemento químico —fabricado *ex profeso*, ya que debido a su vida media hace ya mucho que ha desaparecido de la Tierra— fisionable).

Capítulo 13

La mayoría de edad de la matemática o la tenue frontera entre lo abstracto y lo real

Contenido:

- §1. Teoría de grupos*
- §2. Geometrías no euclídeas*
- §3. El infinito*
- §4. Fundamentos de matemáticas*
- §5. Máquinas matemáticas*
- §6. Caos y fractales*

Hasta, básicamente, comienzos del siglo XIX el desarrollo de la matemática estaba fuertemente condicionado por aquello que era posible físicamente. Así, es difícil a veces decidir en qué clase incluir a científicos como Jean D'Alembert, Johann Bernoulli, Leonhard Euler o Joseph Louis Lagrange. ¿Eran matemáticos o físicos? Ciertamente, todos —estos cuatro sin duda— contribuyeron al desarrollo de lo que podemos denominar, por separado, matemáticas y física, pero el modo como contemplaban la ciencia, la matemática y la física en particular, les fue de gran utilidad en sus trabajos científicos. Cuando, por ejemplo, Johann Bernoulli se enfrentó al problema de la geometría de la catenaria —una cuerda, sometida a la fuerza de la gravedad, que cuelga de dos puntos fijos—, problema que ya había considerado Galileo en 1638, cuando propuso —erróneamente— que la figura era la de una parábola, la estrategia que siguió fue la de tratarlo como si fuera una cuestión mecánica, combinando en consecuencia consideraciones físicas con matemáticas. Al seguir este procedimiento, asumía algo que más tarde los matemáticos no aceptarían: resolvía, por ejemplo, algunas ecuaciones diferenciales recurriendo a construcciones geométricas de lo que veía. «¿Por qué no?», debió de pensar; al fin y al cabo, la matemática y la realidad física estaban perfectamente sincronizadas.

Sin embargo, esta tradición se interrumpió a partir del siglo XIX. Los principales responsables de que aquella tradición ilustrada se rompiera fueron sobre todo Augustin-Louis Cauchy, con quien ya nos encontramos, Évariste Galois (1811-1832) y Neils Hendrik Abel (1802-1829). Como vimos, Cauchy reformuló (junto a Bolzano y Weierstrass) el cálculo como un sistema riguroso autocontenido, divorciado en principio del mundo material y basado en conceptos puramente matemáticos. Galois desarrolló la teoría general de las ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas mediante ecuaciones auxiliares de grado menor. Y Abel compartió bastantes de los intereses y aportaciones de Galois, distinguiéndose asimismo al introducir novedades matemáticas como las funciones elípticas.

Los tres, pero sobre todo Galois y Abel, pensaban que la matemática era un reino autónomo, puro, caracterizado por el rigor lógico y la precisión. Gracias a ellos, se instaló en la imagen de lo que es y debe ser la matemática la creencia de que ésta debe vivir en un reino propio, no contaminado por otras consideraciones —como las que surgen en el reino de la naturaleza—, idea que se resume perfectamente en una célebre frase que el matemático alemán Carl Gustav Jacobi incluyó en una carta que escribió el 2 de julio de 1830 a otro gran matemático, Legendre: «M. Fourier opinaba que la finalidad primordial de las matemáticas consistía en su utilidad pública y en la explicación de los fenómenos naturales; pero un filósofo como él debería haber sabido que la finalidad única de la ciencia es la de rendir honor al espíritu humano y que, por ello, una cuestión sobre números vale tanto como una cuestión sobre el sistema del mundo».

§1. Teoría de grupos

A Galois se debe que las matemáticas se convirtieran en el estudio de las estructuras. Lo que había sido un estudio de objetos se transformó en un estudio de procesos. Fue él quien se dio cuenta de que el problema de desarrollar una teoría general de las ecuaciones algebraicas está regido en cada caso particular por un cierto grupo de sustituciones, en el cual se reflejan las propiedades más importantes de la ecuación algebraica considerada. Este descubrimiento, que los sucesores de

Galois, y en particular Camille Jordan, esclarecerían y desarrollarían, tiene consecuencias que afectan a un área más vasta de la matemática que la teoría de resolución de ecuaciones. Como señaló en 1895 Sophus Lie, a quien volveremos enseguida:

El gran alcance de la obra de Galois se deriva de este hecho: que su teoría, tan original, de las ecuaciones algebraicas es una aplicación sistemática de dos nociones fundamentales como son la de grupo e invariante [...] la noción de invariante es evidente en los trabajos de Vandermonde, Lagrange, Gauss, Ampere y Cauchy. Por el contrario, es Galois el primero, me parece, que introdujo la idea de grupo; y en todo caso, él es el primer matemático que ha profundizado en las relaciones existentes entre las ideas de grupo y de invariante.

En concreto, Galois trabajó con grupos de permutaciones (formas de reordenar objetos). Por ejemplo, al estudiar la ecuación cúbica general, $ax^3+bx^2+cx = 0$, con tres raíces, r_1, r_2, r_3 , se veía conducido a considerar las permutaciones de estas raíces. Y se dio cuenta de que el producto de dos permutaciones cualesquiera es también una permutación. No mucho después, en 1849, el físico francés Auguste Bravais, estudiando problemas de cristalografía, introdujo el concepto análogo de «grupo de simetría» (grupos de simetría particularmente interesantes son los referidos a las rotaciones de un círculo o de la esfera), y en 1849 el inglés Arthur Cayley introdujo el concepto de «grupo abstracto», una estructura matemática definida de la manera siguiente:

Un grupo es una colección de objetos que se pueden combinar en parejas, que satisfacen tres axiomas:

1. Existe un objeto especial, la identidad, que no cambia nada cuando se combina con otro objeto.
2. Todo objeto tiene un inverso, que al combinarse con él produce la identidad.
3. El proceso de la combinación es asociativo; esto es, la combinación de dos elementos del grupo produce otro miembro de éste.

No es necesario que se cumpla también la condición de conmutatividad ($a \cdot b = b \cdot a$, donde \cdot representa una operación, la suma, $+$, por ejemplo), pero sí lo es, se denomina «grupo abeliano».

Como ejemplo tomaremos el caso del grupo que surge de las diferentes maneras en que se puede ordenar el conjunto $\{1, 2, 3\}$. Los factoriales proporcionan la respuesta: $3!$; esto es, $3 \times 2 \times 1 = 6$. Estas seis formas de ordenarlos son: $(1, 2, 3)$, $(1, 3, 2)$, $(2, 1, 3)$, $(2, 3, 1)$, $(3, 1, 2)$ y $(3, 2, 1)$.

En realidad, lo que se hace con estas permutaciones es asociar una función que cambia elementos entre sí; por ejemplo, de $(1, 2, 3)$ obtenemos la $(2, 3, 1)$ mediante la función $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 1$. Ahora bien, cuando asociamos parejas de estas permutaciones obtenemos una de las seis iniciales. Así, tomemos la que lleva de $(1, 2, 3)$ a $(1, 3, 2)$; esto es, la correspondiente a $1 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 2$. El producto de las dos permutaciones se escribirá como $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 3 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 1 \rightarrow 1$, o lo que es lo mismo $(3, 2, 1)$, que es una de las seis iniciales.

Existe, asimismo, una permutación identidad, la $(2, 3, 1)$. Y la inversa. La de $1 \rightarrow 2, 2 \rightarrow 3, 3 \rightarrow 1$ es $1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 1, 3 \rightarrow 2$: en efecto, el producto de ambas es: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 3 \rightarrow 2, 3 \rightarrow 1 \rightarrow 3$, o $(1, 2, 3)$, la unidad.

Vemos, por consiguiente, que las seis permutaciones forman un grupo, que se denomina el «grupo de simetría» de los tres elementos $\{1, 2, 3\}$, o S_3 (la noción de «grupo de simetría», asimismo denominada «grupo de Galois», se aplica también a ecuaciones).

Y en este punto aparecen dos personajes que fueron fundamentales en la ampliación del estudio de los grupos tal y como los había tratado Galois: el noruego Sophus Lie (1842-1899) y el alemán Felix Klein (1849-1925).

El problema en el que se centró Lie fue el de aplicar la teoría de grupos al estudio de ecuaciones diferenciales, que involucran magnitudes continuas (funciones), y no, como había hecho Galois, a las algebraicas; esto es, tratar con grupos continuos y no con grupos discretos. Más concretamente, Lie se planteó si para las ecuaciones diferenciales existía alguna teoría análoga a la que había desarrollado Galois para

las ecuaciones algebraicas. La clave estaba en la simetría: dada una solución de la ecuación diferencial que estudiaba, Lie podía aplicar una transformación (de un grupo determinado) y ver si el resultado era también una solución. Y si encontraba transformaciones de ese tipo, tenía un mecanismo para hallar más soluciones, puesto que la transformación de simetría de una solución sería también solución. De esta manera, se vio conducido a la cuestión de encontrar el grupo de las simetrías de ecuaciones diferenciales.

Desde este punto de vista, el grupo de Lie de una ecuación diferencial expresa una simetría, esto es, una regularidad, que resume la ecuación en cuestión, y si ésta describe un cierto fenómeno físico, entonces el grupo tiene que ver con esa simetría.

Felix Klein captó bien este profundo significado de los grupos. En 1872, al tomar posesión de una cátedra en la Universidad de Erlangen, Klein dedicó su conferencia inaugural a formular lo que desde entonces se denomina Programa de Erlangen, donde defendía la tesis de que la geometría es el estudio de los objetos invariantes bajo un determinado grupo de transformación, definiendo la geometría de la manera siguiente: «Dado un conjunto de cualquier número de dimensiones, y un grupo de transformaciones entre sus elementos, se llama geometría al estudio de las propiedades de aquel conjunto que son invariantes respecto de las transformaciones de este grupo». De esta forma, el estudio de la geometría se reducía al del de todos los grupos de transformación imaginables, que son, por supuesto, infinitos: existen, por consiguiente, infinitas geometrías posibles.

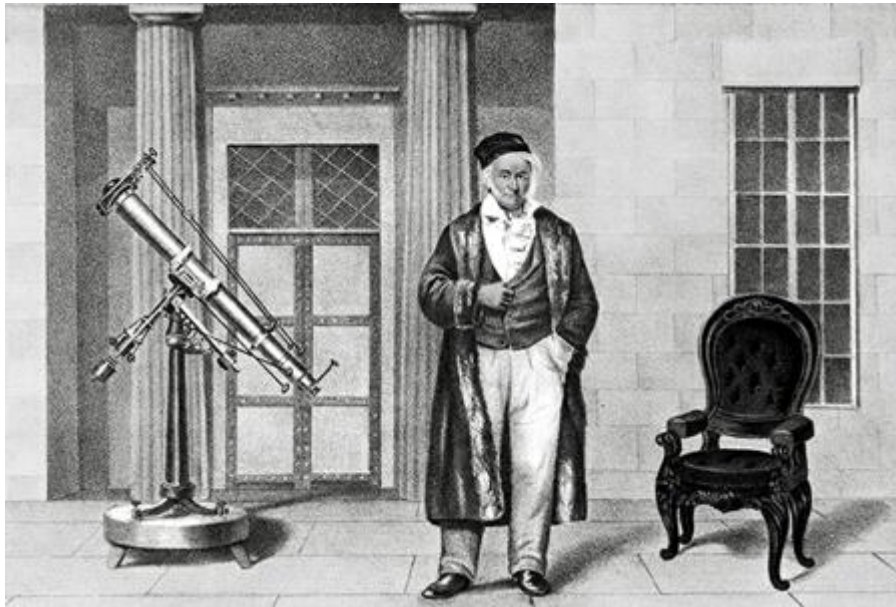
Hablar de invariantes es tanto como hacerlo de simetrías, lo que significa que los desarrollos anteriores permitieron introducir nuevas técnicas para el estudio de las simetrías, una característica que se presenta ampliamente en la naturaleza. Encontramos simetrías, en efecto, en todo tipo de lugares; por ejemplo en los cristales, que, por cierto, exhiben un número elevado de diferentes tipos de simetría (230). El cuerpo humano, al igual que el de otros vertebrados, está básicamente conformado en simetría bilateral; todas las asimetrías son de carácter secundario y las más importantes de las que afectan a los órganos internos están condicionadas a

que el tubo intestinal necesita aumentar su superficie de manera desproporcionada con el crecimiento normal del cuerpo, dando lugar su desarrollo a pliegues asimétricos. Podríamos pensar que la simetría únicamente aparece en el nivel del fenotipo (forma), pero también hay simetría en el del genotipo: la molécula del ADN exhibe una simetría helicoidal.

§2. Geometrías no euclídeas

Otro de los grandes desarrollos en la matemática del siglo XIX tuvo lugar en el campo de la geometría. Recordemos que los *Elementos* de Euclides contienen un postulado, el quinto, que afirma que por un punto exterior a una recta sólo puede pasar una paralela a ésta. Es la geometría en la que se cumplen propiedades tan familiares como la de que los ángulos interiores de un triángulo suman 180 grados. Los repetidos esfuerzos encaminados a demostrar que el quinto postulado de los *Elementos* de Euclides era una pieza superflua en la estructura de la obra, que podía deducirse de otros axiomas, llevaron, durante el primer tercio del siglo XIX, a la sorprendente conclusión de que no sólo era realmente independiente, sino que de su negación no se deducían contradicciones; esto es, que se puede sustituir por otros postulados alternativos que conducen a geometrías diferentes de la euclídea, pero lógicamente correctas. Nos estamos refiriendo a las geometrías asociadas primordialmente a los nombres de Carl Friedrich Gauss (1777-1855), que, sin publicar sus resultados, durante sus estudios de superficies consideradas de manera intrínseca (esto es, sin suponer que están inmersas en un espacio de dimensión superior) llegó a la idea de espacios curvos; el ruso Nicolai Ivánovich Lobachevski (1792-1856), y el húngaro Janos Bolyai (1802-1860). Inicialmente, el descubrimiento de las geometrías no euclídeas atrajo poco interés, pero una combinación de sucesos relanzó su estudio. En primer lugar, la publicación, entre 1860 y 1865, de la correspondencia de Gauss con su amigo el astrónomo Heinrich C. Schumacher, con su referencia favorable al trabajo de Lobachevski. En segundo lugar, la demostración del italiano Eugenio Beltrami, en 1868, de que la geometría de Lobachevski podía interpretarse como la geometría de una superficie de

curvatura constante y negativa. Finalmente, hay que aludir a la lección de habilitación que el germano Bernhard Riemann (1826-1866) pronunció en 1854: *Über die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen* (*Sobre las hipótesis que sirven de fundamento a la geometría*). En honor a Riemann se habla de «espacios riemannianos» para referirnos a una clase muy general de espacios de n -dimensiones que engloban, como un caso particular, los familiares espacios planos de tres dimensiones estudiados por Euclides que tan bien se ajustan a nuestras experiencias sensoriales comunes. Esos espacios riemannianos recibirían un espaldarazo con la teoría de la relatividad general que Albert Einstein desarrolló en 1915, de la que trataremos más adelante.



Carl Friedrich Gauss

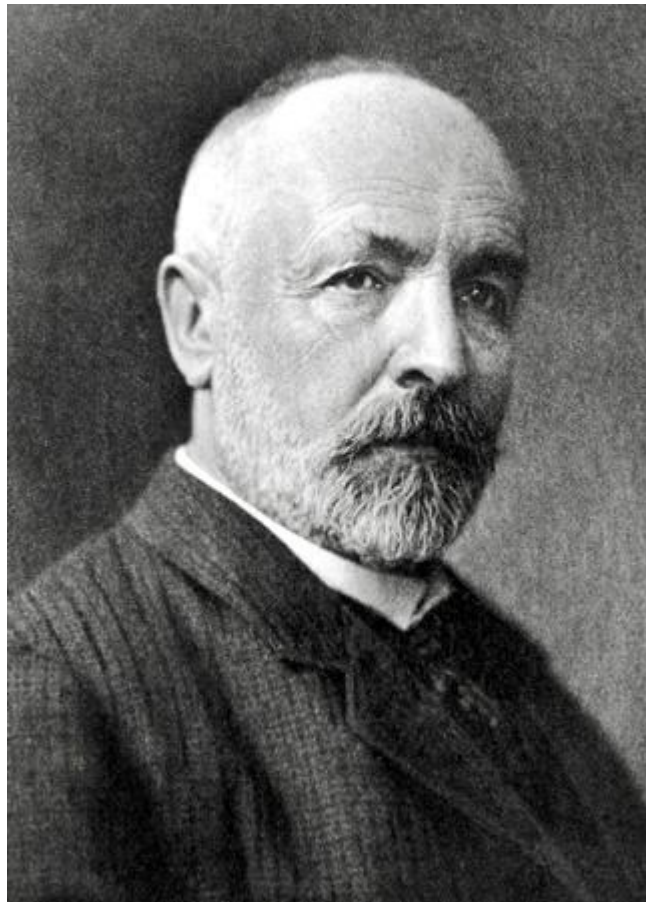
La nueva forma de entender la geometría que ofrecían las construcciones no euclidianas se vio ampliada con un libro que David Hilbert (1862-1943) publicó en 1899, en el umbral de un nuevo siglo: *Grundlagen der Geometrie* (*Fundamentos de la geometría*), en el que axiomatizaba de manera completa la geometría, demostrando así su carácter puramente formal, carácter que ya habían adquirido el álgebra y el análisis. Con un mínimo de simbolismo, Hilbert convenció a la mayor

parte de los matemáticos del carácter abstracto y puramente formal de la geometría, y su gran autoridad estableció el método axiomático no sólo en la geometría del siglo XX, sino también en casi toda la matemática a partir de 1900.

§3. El infinito

Aunque es una caracterización no completamente correcta (pensemos, por ejemplo, en la topología, que se ocupa del estudio de las propiedades de los objetos geométricos que se mantienen cuando los objetos en cuestión son deformados de manera continua, esto es, sin romperlos), la matemática tiene mucho que ver con la cuantificación. Ahora bien, en principio parece que sólo se puede cuantificar aquello que es finito, no lo infinito. Sin embargo, esta idea es errónea, aunque llevó mucho tiempo a los matemáticos comprender bien el sentido de tal error, lo que no quiere decir, como vimos en capítulos anteriores, que la noción de «infinito» no figurase entre sus constructos (dotada además de su propio símbolo: ∞). Aunque en una discusión más completa no podría olvidarse a Bernardus Bolzano, autor de un tratado (publicado póstumamente en 1850) sobre *Paradoxien des Unendlichen* (*Paradojas del infinito*), fue realmente Georg Cantor (1845-1918) quien, a fines del siglo XIX, se dio cuenta de que hay, por expresarlo de alguna forma, muchos infinitos, sentando así las bases de la teoría de conjuntos y de los números transfinitos, que enriquecieron extraordinariamente los estudios matemáticos. La idea que subyace en esta nueva matemática es la de contar los elementos de dos conjuntos poniéndolos en correspondencia, uno a uno, sin repetición ni omisión. De esta manera, es muy sencillo demostrar que hay la misma cantidad de números naturales (1, 2, 3, 4...) que de números pares o impares. Asimismo, todo segmento de una recta contiene el mismo número (infinito) de puntos que no importa qué otro segmento de una línea recta; también —fue el primer descubrimiento revolucionario de Cantor— hay tantos puntos en un plano como en una recta. Ocurre, sin embargo, que estos últimos infinitos no son de la misma naturaleza que el infinito de los números enteros (... , -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3.): es el infinito de los números irracionales (aquellos que no se pueden expresar como cociente de dos

enteros). Nos vemos conducidos así a hablar de números cardinales, el número de elementos que tiene un conjunto: para conjuntos finitos, su número cardinal (o potencia) es el número usual de sus elementos, mientras que para conjuntos infinitos es preciso introducir nuevos términos; Cantor utilizó la primera letra del alfabeto hebreo, K (aleph), seguida del subíndice cero, para denotar el número cardinal del conjunto de los naturales.



Georg Cantor

Este número tiene propiedades que desde la lógica habitual, aristotélica, parecen paradójicas, propiedades como, por ejemplo:

$$\aleph_0 = \aleph_0^2, \aleph_0 = \aleph_0 + \aleph_0, \aleph_0 = 1 + \aleph_0$$

A cualquier conjunto cuyos elementos se pueden poner en correspondencia uno-a-uno con el conjunto de los naturales, Cantor lo denominó «numerable». Ya hemos indicado que los números pares y los impares son numerables, pero es posible demostrar que también lo es el conjunto de los enteros. Lo mismo sucede con los racionales; un número racional p/q se define mediante una pareja $-(p, q)$ de enteros, por tanto la cantidad de racionales será \aleph_0^2 , pero esto es igual, recordemos, a \aleph_0 .

Sin embargo, no ocurre otro tanto con los números reales (que podemos considerar como números decimales con una cantidad ilimitada de cifras decimales). La demostración de que hay más números reales que enteros o naturales no es inmediata, pero Cantor logró probarlo, y asignó a ese nuevo número cardinal la letra c . Se trataba, obviamente, de un mundo completamente nuevo. Un mundo sorprendente para las categorías habituales dentro de la lógica tradicional de lo finito, un mundo que condujo al descubrimiento de nuevos y fecundos continentes matemáticos, como el de la «teoría de conjuntos», que se instaló de manera tan profunda en el cuerpo de la matemática del siglo XX.

La manifestación más evidente de esa influencia es la obra de un colectivo denominado Grupo Nicolas Bourbaki, en el que se distinguieron inicialmente cinco antiguos alumnos de la École Normale Supérieure de París, Henri Cartan, Claude Chevalley, Jean Delsarte, Jean Dieudonné y André Weil, y al que se agregarían más tarde otros tan notables como Laurent Schwartz o René Thom. La meta de este grupo, que en cierta forma reunió todas las tendencias logicistas y estructuralistas anteriores, era reconstruir toda la matemática en base a los conceptos de «conjunto» y «estructura» (como grupos, anillos, cuerpos o campos). Significativamente, eligieron como título de la magna obra que pretendían elaborar el de *Éléments de mathématique* (*Elementos de matemáticas*). Y al igual que el tratado de Euclides, establecieron una división en partes. Sin embargo, pronto se amplió sustancialmente tanto la envergadura como el espíritu del proyecto. En 1941, el plan global del tratado preveía cuatro partes, cada una dividida en libros, que a su vez estarían compuestos por capítulos. Las cuatro partes —es interesante detallar estos puntos— se titularían (en este orden): «Estructuras fundamentales del

análisis» (con 8 libros), «Análisis funcional» (7 libros), «Topología diferencial» (2 libros) y «Análisis algebraico» (8 libros). Por ejemplo, los libros previstos para la primera parte eran: «I. Teoría de conjuntos», «II. Álgebra», «III. Topología general», «IV. Espacios vectoriales topológicos», «V. Cálculo diferencial», «VI. Integración», «VII. Topología combinatoria y variedades diferenciales», «VIII. Funciones analíticas».

Este programa faraónico vio la luz únicamente en parte. El primer volumen apareció en 1939 bajo el encabezado de *Théorie des ensembles* (*Teoría de conjuntos*) y con los subtítulos de *Capítulo I, Descripción de la matemática formal* y *Capítulo II, Teoría de conjuntos*; en realidad era un «fascículo de resultados» de la *Teoría de conjuntos*. Fue una decisión fácil de entender, ya que los miembros del grupo veían en la noción de conjunto el pilar indiscutible de las matemáticas; el que se limitasen a publicar una serie de resultados desprovistos de demostraciones se justifica porque tenían prisa en comenzar, y ese grupo de enunciados era fundamental para continuar la empresa que se habían planteado. En 1965 se publicó el trigésimo primer fascículo, sin haber agotado con él todavía las estructuras fundamentales del análisis, lo que indicaba las crecientes dificultades del proyecto; de hecho, en 1983 apareció un tomo (*Teorías espectrales*) que se reconocía como el último de una obra que quedaría así inacabada, aunque aún llegó otro fascículo en 1998, dedicado al *Álgebra conmutativa*.

§4. Fundamentos de matemáticas

El camino de generalización abierto por matemáticos como Galois, Cantor o Hilbert no se agotó con la teoría de grupos o las nuevas geometrías. Hilbert, en particular, se convirtió en el principal exponente de una de las tres corrientes que caracterizaron la investigación matemática de las primeras décadas del siglo XX: el formalismo, o escuela axiomática, en la que se pretende reducir a una serie de axiomas cualquier construcción matemática (lo que hizo Hilbert con la geometría). El formalismo compartió protagonismo con otras dos escuelas: el logicismo, cuya manifestación más señalada son los tres tomos de Bertrand Russell (1872-1970) y

Alfred North Whitehead (1861-1947), *Principia Mathematica* (1910, 1912, 1913), uno de los grandes tratados de lógica de la historia, y el intuicionismo, asociado al nombre del holandés Luitzen Brouwer (1881-1967), que pretendía fundar la matemática en nociones derivadas de la experiencia, considerando ilegítimo las demostraciones no constructivas. En un artículo que publicó en 1955 («El efecto del intuicionismo en el álgebra clásica de la lógica»), Brouwer resumió sus radicales ideas, describiendo la matemática como «una actividad mental interior construccional que [...] ni en sus orígenes ni en la esencia de su método tiene nada que ver con el lenguaje o con el mundo exterior», repudiando cualquier verdad o existencia en la matemática que «existiese independientemente del pensamiento humano».

Por su parte, en *Principia Mathematica*, Russell y Whitehead pretendían demostrar que toda la matemática se puede basar en la lógica; esto es, que los conceptos de todas las teorías matemáticas, al igual que los métodos de prueba e inferencia, se podrían formular dentro del contexto de la lógica (señalemos que para Russell lógica y aritmética estaban estrechamente ligadas). Fue el suyo, sin embargo, un esfuerzo inútil: fracasó sobre todo, como veremos, debido a los resultados obtenidos por Kurt Gödel.

La lógica, por supuesto, tenía por entonces una larga historia (recordemos las aportaciones de Aristóteles así como los esfuerzos que Leibniz realizó entre 1679 y 1690 por construir una lógica formal, o matemática, basada en tres componentes: un sistema o lenguaje, *characteristica universalis*, que permitiese designar los objetos fundamentales, para poder así ser capaz de expresar mediante fórmulas —al estilo algebraico— cualquier objeto o situación; un procedimiento, *calculus ratiocinator*, que permitiese aritmetizar los enunciados representados en la *characteristica universalis*; y un método, *ars judicandi*, que hiciera posible decidir, sirviéndose del cálculo, la verdad o falsedad de cualquier enunciado expresado en la *characteristica universalis* con ayuda del *calculus ratiocinator*. Fue, sin embargo, en el siglo XIX cuando la lógica formal se situó en uno de los centros del pensamiento matemático. Nombres distinguidos en la historia de la lógica a partir

del siglo XIX son los de George Boole (1815-1864), que propuso una nueva lógica (denominada luego *álgebra* booleana), con una estructura basada en las operaciones de adición, sustracción, multiplicación y dos elementos, 0 y 1, con el deseo, en particular, de lograr una formulación algebraica del comportamiento semántico de las partículas lingüísticas más simples, ideas que presentó especialmente en dos libros, *The Mathematical Analysis of Logic* (*El análisis matemático de la lógica*; 1847) y *An Investigation of the Laws of Thought* (*Un análisis de las leyes del pensamiento*; 1854); Charles Sanders Peirce, que, siguiendo trabajos anteriores de Augustus De Morgan y de William Stanley Jevons, se esforzó en cuantificar las estructuras introducidas por Boole; Ernst Schroder, autor de un monumental tratado en tres volúmenes, *Vorlesungen über die Algebra der Logik* (*Lecciones sobre el álgebra de la lógica*; 1890-1905), en el que introdujo y estudió de manera sistemática la noción general de relación, incluyendo las relaciones de reflexividad, simetría, transitividad y composición de relaciones; Whitehead, que desarrolló un álgebra universal (*A Treatise on Universal Algebra*; 1898) con la que esperaba establecer la lógica algebraica como una rama de la matemática, identificando su estructura algebraica abstracta con la de otras álgebras especiales, como la de los cuaterniones de William Rowan Hamilton (1805-1865) y el cálculo de extensión de Hermann Grassmann (1809-1877); Gottlob Frege (1848-1925), que desarrolló un lenguaje formalizado según la lógica de predicados, y Giuseppe Peano (1858-1932), que se esforzó por dotar de mayor precisión lógica a toda la matemática.

Independientemente de sus particulares puntos de vista, el sentimiento general entre los matemáticos era que la matemática es un sistema lógico asentado sólidamente en unos pocos pilares, los axiomas. Aunque había que demostrarlo, como recordó Hilbert en una conferencia memorable, que pronunció durante el Congreso Internacional de Matemáticos celebrado en París en agosto de 1900 y que pasaría a formar parte de la historia (y de la épica) de esta disciplina. En aquella ocasión Hilbert enumeró 23 problemas fundamentales para la matemática; uno de ellos, el segundo, planteaba la esencia del problema al que nos estamos refiriendo: era

preciso, manifestó, «demostrar que los axiomas no son contradictorios; es decir, hay que demostrar que basándose en los axiomas jamás se podrá llegar a resultados contradictorios mediante un número finito de deducciones lógicas».

Desgraciadamente, ni siquiera en el reino de la matemática se cumplen pretensiones tan aparentemente racionales. A pesar de los logros innegables alcanzados en *Principia Mathematica*, a la postre, como apuntamos, no pudo alcanzar su meta. La respuesta negativa a las esperanzas de los logicistas y también de los formalistas sorprendió no tanto a estos dos como a los intuicionistas. Provino ésta de un lógico nacido en Brno (Moravia, Chequia): Kurt Gödel (1906-1978). En 1931 se publicó el trabajo más famoso de Gödel, un artículo que conmocionó tanto a la matemática como a la filosofía y que arruinó las esperanzas de hacer de aquella una disciplina reducible a la lógica. Se titulaba: «Über formal unentscheidbare Sätze von *Principia Mathematica* und verwandter System» («Sobre sentencias formalmente indecidibles de *Principia Mathematica* y sistemas afines»), y en él Gödel demostró que la respuesta al segundo problema planteado por Hilbert en 1900 era, básicamente, negativa: que no es posible lograr un reduccionismo completo en los sistemas matemáticos clásicos, ya que existen sentencias que no podemos demostrar si son o no ciertas, y sistemas cuya consistencia es imposible verificar. Un sistema como la aritmética contiene proposiciones cuya verdad no se puede probar desde dentro del sistema, de manera análoga, en cierto sentido, a la paradoja lingüística que tanto afectó a Bertrand Russell: «Supongamos que un hombre dice: “Soy un mentiroso”. Si es mentiroso, su afirmación es verdadera. Si no es mentiroso, entonces, al decir que es mentiroso, es mentiroso, luego dice la verdad (no es mentiroso). Por consiguiente, cualquier hipótesis implica su contradictoria».

§5. Máquinas matemáticas

Durante la mayor parte de la (muy larga) historia de las matemáticas, las herramientas que servían para calcular, como el ábaco, eran bastante sencillas, controladas en cada paso manualmente. Y con el avance científico y tecnológico, se fue haciendo cada vez más patente la necesidad de disponer de máquinas más

poderosas.

Blaise Pascal y Gottfried Leibniz inventaron las primeras que podían realizar operaciones aritméticas de manera automática. La de Pascal, que construyó en 1642, podía sumar y restar cantidades de hasta seis dígitos, mientras que la de Leibniz era capaz de multiplicar. En el siglo XIX, el británico Charles Babbage ideó y construyó varios prototipos, pero no llegaron a funcionar. La necesidad de disponer de estos aparatos era tan evidente que encontramos que algunos científicos distinguidos de esta centuria, como Maxwell y Kelvin, construyeron instrumentos bien para calcular o para representar funciones. Todos eran, sin embargo, muy deficientes. Un paso importante fue el que dio en la década de 1930 el ingeniero del Massachusetts Institute of Technology Vannevar Bush, quien desarrolló un instrumento mecánico del tamaño de una habitación para resolver ecuaciones diferenciales: el analizador diferencial. Pero la era de los calculadores mecánicos llegó pronto a su fin. La historia de los esfuerzos que condujeron al nacimiento de la era de los computadores electrónicos modernos debe mucho a Alan Turing (1912-1954). En 1936, Turing publicó un artículo titulado «Sobre números computables, con una aplicación al problema de la decisión», que respondía a cuestiones planteadas por Hilbert en 1928, durante el Congreso Internacional de Matemáticos celebrado en Bolonia: si existe algún procedimiento automático capaz de decidir cualquier cuestión matemática. En lugar de utilizar instrumentos como los lenguajes formales universales basados en la aritmética, Turing recurrió a unos instrumentos formales mucho más intuitivos y productivos: una máquina digital de calcular abstracta —una «máquina universal», posteriormente conocida como «máquina de Turing»— que a la postre proporcionó la base teórica para el funcionamiento de los modernos computadores.

Provisto de semejante instrumento conceptual y operativo, Turing demostró —un resultado que había obtenido unos meses antes, bajo otros planteamientos, Alonzo Church (1903-1995)— que ciertas tareas matemáticas no se pueden automatizar, o, en otras palabras, que ciertas funciones matemáticas no son computables, lo que significa que no es posible decidir algorítmicamente si una máquina de Turing dada

se detendrá o no alguna vez (para que una de estas máquinas pueda calcular algo debe detenerse). Unidos a los de Gödel, estos resultados mostraron definitivamente que no era posible establecer si la matemática es un sistema completo, que el sueño de hallar un algoritmo que permitiese determinar la verdad o falsedad de todas las proposiciones matemáticas era eso, un sueño, pero un sueño imposible.

Las ideas introducidas por Turing constituyeron una pieza maestra conceptual en el posterior desarrollo de los ordenadores, al ser su máquina el equivalente lógico exacto de un ordenador, instrumento que, por otra parte, no existía aún en 1936. En otras palabras, el ordenador, sin el cual la segunda mitad del siglo XX habría sido muy distinta, se concibió primero bajo una forma ideal, antes de reflejarse en una máquina real. Es cierto que la máquina de Turing no es ni siquiera, en un sentido mínimamente práctico, el boceto de un ordenador, pero sí que fue su «substrato teórico-conceptual». Luego vendrían matemáticos e ingenieros que, interesados por el problema de la computación, con la ayuda de las disponibilidades tecnológicas y estimulados por circunstancias concretas, construirían ordenadores reales: como el Colossus, que entró en funcionamiento en Inglaterra en 1943 para descifrar (tarea en la que participó el propio Turing) códigos secretos de los alemanes (constaba de 1.500 válvulas electrónicas), basado en el diseño del matemático Max Newman, que a su vez se inspiró en la máquina universal de Turing.

Por su parte, en Estados Unidos los problemas de cálculo representaron un apartado importante de las tareas del Manhattan Engineer District, esto es, el Proyecto Manhattan, creado para fabricar bombas atómicas. Cuando el matemático húngaro afincado en Princeton desde 1931, John von Neumann (1903-1957), se unió a los trabajos del programa de implosión (colapso hacia un estado supercrítico de materiales fisionables, Pu-239 o U-235, mediante la detonación de potentes explosivos puestos a su alrededor), pronto encontró que le era imposible obtener soluciones numéricas para su modelo matemático de implosión; los grupos de calculadores con instrumentos de cálculo manuales no podían manejar las grandes cantidades de operaciones que era preciso realizar. Para progresar era necesario mejorar la capacidad de cálculo, y Von Neumann se dedicó a recorrer las

instalaciones de cálculo que existían en la Universidad de Harvard y en los laboratorios Bell, pero las máquinas que vio no satisfacían sus necesidades. Afortunadamente, en agosto de 1944 Von Neumann coincidió con Hermann Goldstine, a través del cual se enteró de que en la Moore School of Electronics Engineering de la Universidad de Pennsylvania se estaba construyendo un computador electrónico, el ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer* [Computador Integrador Numérico Electrónico]), para los Ballistic Research Laboratories, uno de los centros estadounidenses más importantes de investigación científica aplicada a la guerra, para el que también trabajaba como asesor el matemático húngaro. Cuando Von Neumann se puso en contacto con los miembros de la Moore School ya estaba claro que no existían serios obstáculos para finalizar la construcción de ENIAC, un instrumento enorme que contenía 18.000 válvulas (recordemos que Collossus tenía 1.500); de hecho, ya se estaba pensando en la siguiente máquina de la familia, EDVAC (*Electronic Discrete Variable Arithmetic Computer* [Computador Electrónico de Variables Aritméticas Discretas]). Von Neumann se sumó a este proyecto, dedicándose al estudio de los problemas de su organización lógica, un trabajo que también le llevó a cuestiones relativas a las analogías existentes entre ordenadores y cerebro humano. Además, fue partidario de que los físicos de Los Álamos utilizaran el ENIAC para algunos de sus cálculos.

Una vez finalizada la guerra, en 1945, Von Neumann decidió que quería disponer de su propio computador en Princeton. Inicialmente las autoridades y miembros del Institute for Advanced Study no recibieron con agrado la propuesta; al fin y al cabo el instituto había sido concebido como un centro apartado de las investigaciones experimentales. Sin embargo, él manejó con habilidad ofertas de trabajo de otras universidades para conseguir el apoyo de la citada institución. La máquina, popularmente conocida como JOHNNIAC, se construyó con el apoyo de la Armada y de la Atomic Energy Commission, entrando en funcionamiento en 1952. Aun representando un gran avance con respecto a las máquinas calculadoras mecánicas, los nuevos instrumentos electrónicos, basados en válvulas de vacío

(diodos y triodos), tampoco duraron mucho.



Robert Oppenheimer y John von Neumann delante de una de las primeras computadoras electrónicas

El golpe de gracia provino del descubrimiento del transistor en 1947. Entre las compañías que entendieron la utilidad de los transistores se encuentran Fairchild Semiconductors y Texas Instruments, que en 1952 decidieron dedicarse a explotar sus posibilidades. Ninguna de las dos había tenido que ver previamente con la industria de las telecomunicaciones y por ello buscaron nuevos escenarios comerciales, como las calculadoras, en las que Texas Instruments desempeñó, junto con IBM, un papel dominante durante algún tiempo. Fue en Fairchild Semiconductors donde Jean Hoerni desarrolló en 1957 las técnicas fundamentales (proceso «planar») para la fabricación de los chips. El primer circuito integrado fue construido allí por Robert Noyce en 1958. Diez años después (1968), Noyce dejó Fairchild para fundar, junto a Gordon Moore, Intel, donde dirigió con Ted Hoff la invención del microprocesador, que generó una nueva revolución, uno de cuyos pilares fundamentales fue la sustitución de las señales analógicas, características de las comunicaciones electrónicas anteriores, por las digitales, preferibles porque con ellas es más fácil realizar operaciones como codificación, limpieza de ruido de fondo, compresión, almacenamiento o reproducción. Para convertir, digitalizar,

señales analógicas en digitales, hay que tomar muestras poco espaciadas de las señales, de modo que puedan utilizarse para producir una réplica aparentemente perfecta, esto es, aparentemente continua. El mecanismo principal para lograrlo es realizar de forma periódica medidas de la amplitud de la señal analógica de partida y redondear sus valores a un conjunto finito de niveles preestablecidos de tensión, registrándolos como números enteros en algún tipo de memoria o soporte. Las técnicas digitales fueron posibles gracias a los trabajos ya citados de Boole, para cuyas estructuras matemáticas no necesitaba recurrir más que a dos números, el 0 y el 1.

Poco a poco, pero cada vez con más rapidez, utilizando los circuitos integrados (que engloban números muy elevados de transistores), los computadores se hicieron más potentes, más rápidos, más pequeños y más baratos. Hasta que en la década de 1970 llegaron los computadores personales (*personal computers*); esto es, los PC. Aunque no era realmente lo que hoy entendemos por un ordenador personal, el paso de las macrocomputadoras a los PC comenzó cuando una empresa poco conocida de Nuevo México sacó a la venta (por 400 dólares) en 1975 el Altair, aparato informático que desencadenó una serie de desarrollos que condujeron a que, en 1977, se pusiese a la venta el Apple II, creado por Steve Jobs y Stephen Wozniak. Un año antes, Bill Gates había fundado Microsoft, empresa que terminaría dominando una gran parte de este mundo a través, sobre todo, de los desarrollos que creó en el ámbito del *software*, los lenguajes de programación. En la década siguiente, la de 1980, esos computadores personales se extendieron por los países desarrollados, siendo utilizados para todo tipo de servicios, entre otros los de muchas empresas, que pasaron a depender de ellos. De uno de los modelos producidos, el Commodore 62, que comenzó a comercializarse en 1982, se habían vendido 17 millones de unidades en 1994.

El mundo digital es el reino de las terminales; de los ya prácticamente desaparecidos CD-ROM (*compact disc-read only memory*); de los módems (modulator-demodulator), aparatos que convierten las señales digitales de los ordenadores en analógicas para poder transmitir la información por la red

telefónica, y viceversa; de las memorias que retienen los *bytes* (un número fijo de bits, actualmente 8 bits, como un octeto), *megabytes* (1 *megabyte* es igual a un millón de *bytes*) y sucesivas unidades, como *gigabytes*, *terabytes*, etc.; del ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*); de Telnet e Internet; del correo electrónico; de los servidores; de las redes; de Microsoft, IBM y Apple; de la fibra óptica, que está sustituyendo a los cables de cobre; de las ya superadas por Internet «autopistas de la información» (red de sistemas de comunicaciones por los que circulan gran cantidad de datos) y de las realidades virtuales (aplicaciones producidas para medios electrónicos con las que proporcionar experiencias visuales, dotadas de animación, que una persona puede recorrer y explorar, construyendo un mundo propio y exclusivo, al que efectos ópticos y fisiológicos dan la apariencia de tridimensional, un mundo donde vivir una nueva vida paralela). En la frenética dinámica de innovación tecnológica, los PC han sido casi sustituidos por las denominadas «tabletas» (tabletas-computadores) y por nuevas generaciones de teléfonos móviles inteligentes, o *smartphones*, como los iPhones, que poseen conexión a Internet, pantallas táctiles (carecen de teclado físico), o los iPad, un dispositivo tipo tableta desarrollado como el anterior por Apple, a caballo entre un PC y un *smartphone*.

§6. Caos y fractales

La disponibilidad de computadores electrónicos de alta velocidad y gran capacidad de cálculo permitió simulaciones numéricas de estructuras matemáticas de gran complejidad (entre ellas las correspondientes a los sistemas no lineales), así como abordar problemas inaccesibles a los métodos analíticos, dando origen a una matemática diferente de la clásica, una «matemática experimental». Un ejemplo especialmente notable del poder de este tipo de investigación matemática fue el trabajo del estadounidense Edward Lorenz (1917-2008). Graduado en matemáticas en el Dartmouth College en 1938, Lorenz amplió sus estudios en la Universidad de Harvard, en donde permaneció el curso 1941-42 colaborando en tareas docentes matemáticas. Al ser movilizadado en la Segunda Guerra Mundial, pasó a formar parte

del servicio de predicción del tiempo de las Fuerzas Aéreas. Aquel trabajo marcó un punto de inflexión en su carrera, ya que nunca abandonaría la investigación de los fenómenos atmosféricos, aunque en modo alguno desapareciese el matemático que había en él. Inmediatamente después de finalizada la contienda y de ser licenciado, se centró, en efecto, en la meteorología. En 1946, ingresó como estudiante de doctorado en el Massachusetts Institute of Technology, doctorándose dos años después. Comenzó entonces su carrera académica. Encargado en 1955 de la dirección de un proyecto sobre predicción numérica estadística del clima, Lorenz se apoyó para desarrollarlo en la disponibilidad de ordenadores. Gracias a ellos llegó su mayor éxito científico: analizando los datos obtenidos con una de estas máquinas, observó empíricamente algo que Henri Poincaré había previsto mucho antes, que existen sistemas que pueden desplegar un comportamiento altamente complicado, impredecible (lo que no implica no sujeto a leyes), sistemas en los que pequeñas diferencias en un sola variable tienen efectos profundos posteriormente, provocando que cambien radicalmente. Por eso fueron denominados «sistemas caóticos».

El artículo «Flujo determinístico no periódico», en el que Lorenz presentó sus hallazgos, se publicó en el *Journal of the Atmospheric Sciences* en 1963. Por entonces pocos científicos que no fueran meteorólogos repararon en él, una situación que cambió a lo largo de la década siguiente, favorecida por la constatación de la importancia de los sistemas no lineales (todo sistema caótico es no lineal), en los que los procesos de retroalimentación desempeñan un papel central. Visto retrospectivamente, desde la perspectiva de que los fenómenos de los que se ocupa la meteorología son sistemas caóticos, esto es, sistemas que dependen fuertemente de las condiciones iniciales, podemos comprender por qué el clima es tan difícil de pronosticar. Como muy gráficamente manifestó el propio Lorenz en una conferencia que pronunció en diciembre de 1972: «El aleteo de una mariposa en Brasil puede producir un tornado en Texas», una frase que terminó afincándose en la cultura popular.

Otros sistemas no lineales de gran atractivo descubiertos por matemáticos son las

estructuras geométricas denominadas «fractales», término, el de «fractal», acuñado por el matemático de origen polaco afincado en Francia Benoit Mandelbrot (1924-2010) en un artículo publicado en 1975 en las *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, «Geometría fractal de la turbulencia», entre cuyas propiedades se encuentra la de tener dimensiones no enteras, como $3/2$ o $\log_2 3 / \log_3 2$, algo realmente sorprendente habida cuenta de que estamos acostumbrados a entes geométricos de dimensiones 3 (volúmenes), 2 (áreas), 1 (líneas) o 0 (puntos). El propio Mandelbrot manifestó en un libro que escribió con Richard Hudson (*Fractales y finanzas*, 2008):

La obra de mi vida ha sido desarrollar una nueva herramienta matemática para incluir en el exiguo equipo de supervivencia del hombre. La llamo geometría fractal y multifractal. Es el estudio de la escabrosidad, de lo irregular y tortuoso. Acuñé su denominación en 1973. Fractal deriva de fractus, participio pasado de frangere, romper, como me recordó uno de los diccionarios de latín de mis hijos. La misma raíz pervive en muchas palabras comunes, incluidas fracción y fragmento. Concebí estas ideas a lo largo de varias décadas de vagabundeos intelectuales, reuniendo muchos artefactos y asuntos perdidos, olvidados, subexplorados y en apariencia inconexos del pasado matemático, extendiéndolos en todas direcciones y creando un cuerpo de conocimiento matemático nuevo y coherente.

Mandelbrot se dio cuenta de que los fractales, esas curvas aparentemente monstruosas, irregulares, cuya estructura se repite a diferentes escalas, abundan, efectivamente, en la naturaleza. De forma parecida (pero no igual) a lo que sucede en el movimiento browniano, la geometría de fenómenos como, por ejemplo, el contorno de una costa, la distribución de estrellas en el Universo y la estructura de nubes de gases interestelares, la turbulencia o la forma de un árbol, es fractal. En palabras del propio Mandelbrot en el libro que acabamos de mencionar:

La geometría fractal se contempla hoy como «natural», y se emplea para un conjunto improbablemente diverso de tareas: comprimir imágenes digitales

en internet, medir fracturas metálicas, analizar ondas cerebrales en un electroencefalograma, diseñar antenas de radio miniaturizadas, fabricar mejores cables ópticos o estudiar la anatomía de los bronquios. Los métodos de la geometría fractal se han convertido en parte del utillaje de la dinámica de fluidos, la hidrología y la meteorología. Su potencia procede de su capacidad única para expresar gran cantidad de datos complejos e irregulares en unas cuantas fórmulas simples».

Mandelbrot también observó que los fractales aparecen en los movimientos del mercado de valores, lo que quiere decir que también existen en la economía. De hecho, dedicó grandes esfuerzos a este campo. Vemos de esta manera cómo un fruto de la matemática abstracta como los fractales se manifiesta en numerosos recovecos de las ciencias sociales y de la naturaleza, un hecho que muestra que en realidad las fronteras entre lo abstracto y lo real son más aparentes que auténticas.

Capítulo 14

Todo es relativo: Einstein

Contenido:

- §1. Sistemas de referencia*
- §2. La teoría del electrón de Lorentz*
- §3. La relatividad especial*
- §4. La teoría de la relatividad general*
- §5. Unificación (geométrica) de fuerzas*

§1. Sistemas de referencia

Los fenómenos se producen en un instante y lugar determinados, y son contemplados por observadores que se encuentran en una situación específica. Con respecto al sistema geométrico (espacio) que se toma como marco de referencia, esos observadores pueden:

1. no moverse (reposo);
2. moverse con velocidad constante (movimiento uniforme); o
3. moverse con velocidad variable (movimiento acelerado).

Obviamente, los marcos de referencia constituyen elementos esenciales cuando se trata de describir el movimiento de los cuerpos. En sus estudios, durante el siglo XVII, Galileo prestó especial atención a este punto. En su primer *Diálogo*, el de 1632, se detuvo varias veces para explicar que un observador situado en la cabina cerrada de un barco no podía decidir si el barco estaba en reposo o se movía con velocidad uniforme; únicamente podía salir de dudas si abría un tragaluz y miraba a la costa. En el primer caso, el marco de referencia estaba constituido por las paredes del camarote, en el segundo, por la línea de la costa.

Podría, por supuesto, haber sido diferente; esto es, la naturaleza podría ser de tal manera que reposo y movimiento uniforme no fuesen «dinámicamente equivalentes», pero no es esto lo que sucede y, por consiguiente, había que

incorporar este resultado observacional en cualquier teoría del movimiento (mecánica) que se construyese.

Otra de las situaciones que consideró Galileo fue la de un observador situado en la cubierta, que presenciaba la caída de un cuerpo desde la cofa.

Para él, dicha caída describiría una trayectoria rectilínea perpendicular, mientras que otro colocado fuera del barco, a una cierta distancia, contemplaría — ciertamente así sucedería si pudiese hacer (algo imposible en tiempos de Galileo) una película a gran velocidad— cómo la trayectoria del movimiento del objeto se alejaba continuamente de la perpendicular. Un mismo fenómeno (la caída del cuerpo) descrito de dos maneras diferentes, según el marco de referencia considerado.

Es muy importantes señalar que los marcos, o sistemas, de referencia que Galileo consideraba implicaban relaciones entre movimientos uniformes o situaciones de reposo. Son los sistemas de referencia inerciales, mientras que los que consideran movimientos acelerados son no inerciales.

Para Galileo, al igual que para Newton, nada cambiaba desde el punto de vista de las leyes de la física del movimiento si se tomaban como marco de referencia sistemas inerciales diferentes. Ahora bien, esto no quiere decir que la introducción de un segundo marco de referencia no complicase la explicación. Consideremos, por ejemplo, una partícula, P , que se mueve con velocidad v en el sistema de referencia A , y que, a su vez, éste se mueve con velocidad u con referencia a un sistema de referencia B . Según Galileo y Newton (y también de acuerdo a nuestra intuición), la velocidad de P con respecto a B será la suma de v y u ; esto es $v + u$.

El que las leyes del movimiento deben ser las mismas independientemente de cuál sea el sistema de referencia inercial que se esté utilizando constituye un rasgo fundamental de la mecánica newtoniana, al que se suele denominar «principio de relatividad de Galileo».

Galileo se movió sobre todo en el terreno de la experimentación, prestando especial atención a la cuantificación de medidas; aunque no careció de un marco teórico, éste no estuvo nunca tan desarrollado como el que estableció Newton en los

Principia, cuyo edificio teórico se basó en un marco de referencia en el que el espacio se consideraba, al igual que el tiempo, una magnitud de referencia absoluta. Existían un espacio (un marco geométrico) y un tiempo absolutos, aunque al describir con la ayuda de sistemas de referencia inerciales diferentes una misma situación se introdujesen magnitudes (espaciales) relativas. En el caso de dos sistemas de referencia inerciales, con uno de ellos moviéndose con velocidad v con respecto al otro a lo largo de la dirección del eje de las x , las ecuaciones que relacionan las coordenadas de ambos sistemas son las denominadas «transformaciones de Galileo»:

$$x' = x - v \times t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Sería a principios del siglo XX, cuando la física relativista de Einstein modificaría radicalmente el estatus de estas transformaciones.

§2. La teoría del electrón de Lorentz

En el camino que condujo finalmente a la formulación de la teoría de la relatividad especial, desempeñaron un papel muy importante los trabajos que el físico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) llevó a cabo para integrar el electrón en la electrodinámica de Maxwell.

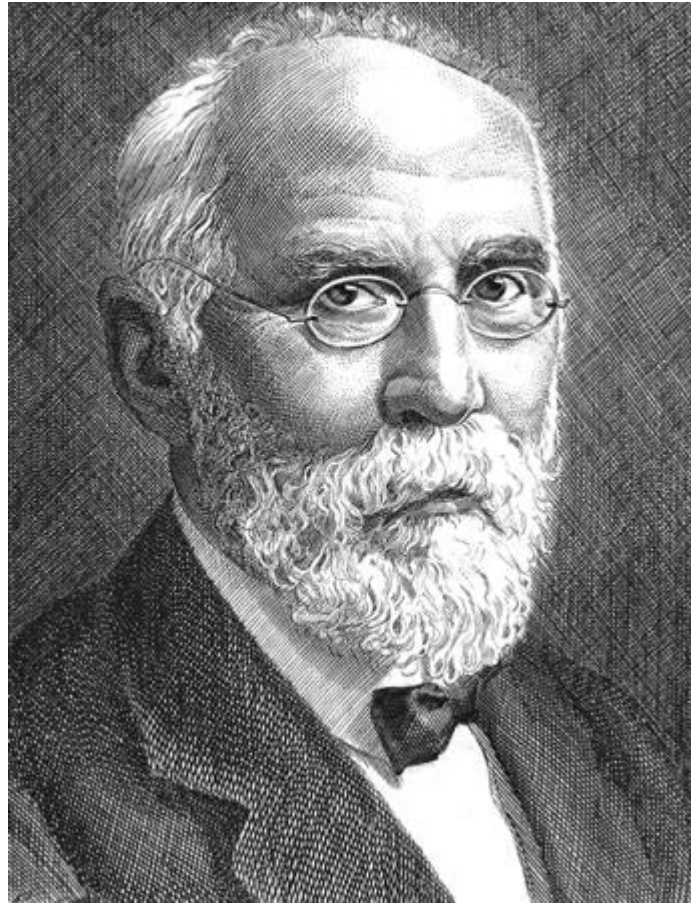
En este punto hay que señalar de entrada que Maxwell no aportó demasiadas precisiones acerca de la naturaleza y estructura del medio electromagnético, convertido en el buscado soporte de las ondas de luz. De hecho, cuando se estudia el camino que le condujo a elaborar su teoría, nos encontramos con que al principio, y siguiendo el procedimiento de buscar analogías con otras construcciones teóricas, el campo electromagnético que manejaba era en realidad una construcción de naturaleza mecánica en la que aparecían celdas separadas por rodaduras. Lentamente, aquel campo se fue desproviniendo de sus connotaciones

mecanicistas para convertirse en un medio de naturaleza más abstracta, cuya realidad se basaba en que poseía atributos físicos como energía.

Pero la tarea de enfrentarse a los problemas que habían sacado a la luz científicos como Young, Arago o Fresnel no recayó en Maxwell, sino en Lorentz. Hay que recordar, en primer lugar, que con las ecuaciones del campo que estableció, Maxwell había resuelto el problema de cómo variaba (dinámica) el campo electromagnético, el vehículo de la interacción electromagnética, pero no la cuestión de cómo ese campo afectaba a sus fuentes productoras y era afectado por ellas; como, por ejemplo, interaccionaban el campo y las cargas eléctricas. Lo primero que hizo Lorentz fue intentar explicar la óptica clásica en base electromagnética, tarea para la que encontró ayuda en los trabajos de Fresnel. El primer producto de estos intereses de Lorentz fue su tesis doctoral, titulada *Over de theorie der terugkaatsin en breking van het licht (Sobre la teoría de la reflexión y refracción de la luz; 1875)*. Comenzaba este primer trabajo con una exposición crítica de la teoría de la luz de Fresnel, para pasar a continuación a la teoría de la luz según Maxwell y, en concreto, a la explicación que se podía dar, tomándola como base, de los fenómenos ópticos de reflexión y refracción.

Embarcado en semejante programa, Lorentz tuvo que enfrentarse también con la cuestión de la naturaleza del campo electromagnético. Algunos años después de completar su tesis, Lorentz publicaba un artículo, «Sobre la influencia del movimiento de la Tierra sobre los fenómenos luminosos» (1886), en el que abordaba la cuestión de «en qué grado el éter participa del movimiento de los cuerpos que lo atraviesan», o, en otras palabras, el problema del «coeficiente de arrastre parcial de Fresnel». La posición de Lorentz en este artículo era negar que existiera arrastre en absoluto, lo que significaba, naturalmente, entrar en conflicto con la explicación de Fresnel. Lorentz argumentaba que la modificación que experimentaba la velocidad de la luz en un medio activo ópticamente y en movimiento era debida a la influencia que las moléculas que constituían ese medio ejercían sobre el éter en sus alrededores inmediatos (obviamente, la posición atomista de Lorentz —su teoría del electrón— jugaba un papel central en este

cambio de interpretación con respecto a Fresnel).



Hendrik Antoon Lorentz

Un punto muy importante es que para Lorentz existía algo así como un valor absoluto, de referencia, para la velocidad de la luz: el que ésta tenía en un sistema en reposo con respecto al éter-campo electromagnético, que, en su opinión, desempeñaba más o menos el mismo papel que el espacio absoluto newtoniano, efectuándose sobre él los movimientos de todos los cuerpos (incluidas las fuentes de luz). Lorentz tenía, además, que recurrir a las transformaciones de Galileo cuando quería describir, por ejemplo, la dinámica del campo electromagnético asociado a una carga que se moviese con respecto a ese éter electromagnético absoluto, y cuando aplicaba esas transformaciones a las ecuaciones del campo (o a la ecuación que describía las ondas electromagnéticas, que se obtenía a partir de las

ecuaciones del campo), éstas variaban de forma, lo que significaba, entre otras cosas, que la velocidad de la luz en el nuevo sistema de referencia inercial asociado a la carga en movimiento era diferente a la de la luz en el vacío definido por el éter electromagnético de referencia.

Sin embargo, una vez más la observación impondría sus reglas. Y es que una cosa es lo que pensamos, sobre la base de nuestras expectativas fundadas en la experiencia o en las teorías científicas en las que creemos, y otra lo que realmente sucede en la naturaleza.

El año siguiente a la publicación del último artículo de Lorentz que hemos citado, esto es, en 1887, en su número de diciembre la revista inglesa *Philosophical Magazine* publicaba un trabajo firmado por dos físicos estadounidenses, Albert Michelson y Edward W. Morley, titulado «Sobre el movimiento relativo y el éter luminífero». En su experimento, Michelson y Morley emplearon un interferómetro; esto es, un aparato que utiliza las propiedades ondulatorias de la luz de la siguiente manera: cuando un haz de luz que procede de una fuente se divide en dos haces que se vuelven a unir después, el haz resultante mostrará zonas de interferencia visibles si la trayectoria de uno de los haces sufre algún cambio antes de volver a reunirse con el otro haz. Como las ondas de luz (su longitud de onda) que generan las interferencias son muy pequeñas, una variación minúscula en la longitud de la trayectoria o en el índice de refracción del medio que recorre uno de los haces producirá un efecto que se puede medir. Uno de los primeros en utilizar este tipo de instrumento fue un francés, Jules Jamin, en 1856. Su modelo fue perfeccionado por Fizeau en 1862, y luego, con una precisión nunca antes alcanzada, por Michelson.

Como vimos, según Fresnel la Tierra no arrastra completamente al éter; existe un arrastre, pero es parcial. En otras palabras, la Tierra se mueve con respecto al éter. Michelson se planteó detectar experimentalmente ese movimiento: si efectivamente existía tal movimiento, el tiempo que tarda un rayo de luz emitido en la superficie terrestre debía ser diferente según que éste se moviese en el sentido de movimiento de la Tierra con respecto al éter o en sentido opuesto. El efecto, ese «viento etéreo», sería muy pequeño, pero al alcance de las medidas en un interferómetro,

muy preciso. Michelson realizó el experimento en 1881 por vez primera. Los errores cometidos en estos intentos iniciales le llevaron a repetir la experiencia, con un interferómetro más preciso, en 1887, y con la colaboración de Morley. Compararon el tiempo que necesitaba la luz para cubrir los diferentes brazos del interferómetro en ambos sentidos, para deducir el movimiento de la Tierra, y no encontraron ninguna diferencia; parecía que el éter no afectaba al movimiento de la luz.

El experimento de Michelson y Morley generó una crisis en la física. Además de Lorentz, a quien volveremos enseguida, un irlandés, George Francis FitzGerald (1851-1901), se distinguió en 1889 al proponer, de una forma *ad hoc*, que el efecto se debía a que el movimiento con respecto al éter absoluto maxwelliano producía un acortamiento del brazo del interferómetro que seguía la dirección del movimiento (no en la dirección perpendicular al movimiento); esto es, que se producía una «contracción de longitudes». Lorentz también utilizó esta hipótesis, pero dentro de su propio programa de investigación. Manteniéndose fiel tanto a la dinámica newtoniana como a la electrodinámica maxwelliana, y a lo largo de sucesivos artículos (el último de 1904), fue capaz de explicar los resultados de experimentos como el de Michelson y Morley introduciendo un cambio en las ecuaciones que, en la mecánica tradicional de Newton, relacionan posiciones y tiempo en dos sistemas de referencia inerciales (aquellos que se mueven entre sí con velocidad constante). Como homenaje a su contribución todavía hoy se denomina a tales ecuaciones, que mantienen su validez en la teoría de la relatividad especial, «transformaciones de Lorentz». Son las siguientes:

$$x' = \gamma \times (x - \beta \times c \times t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma \times [t - (\beta/c) \times x]$$

donde

$$\gamma = [1 - (v^2/c^2)]^{-1/2} \text{ y } \beta = v/c.$$

Visto desde un punto de vista formal, matemático: con estas transformaciones las ecuaciones del campo electromagnético, y la ecuación de ondas, no variaban de forma cuando se las describía en sistemas de referencia inerciales diferentes; eran, como se diría con el paso del tiempo, «invariantes Lorentz».

Un punto que es preciso señalar es el del carácter de la transformación en la variable temporal. A Lorentz no le planteaba ningún problema conceptual aceptar que las longitudes se modificaban: la materia era en última instancia agrupaciones de moléculas, y éstas se mantenían unidas, pensaba, mediante fuerzas electromagnéticas. Ahora bien, el movimiento del interferómetro con respecto al éter electromagnético en reposo absoluto debería producir cambios en las fuerzas intermoleculares que afectarían a sus longitudes. Sin embargo, el tiempo era diferente; no se le podía aplicar un esquema conceptual parecido. De hecho, Lorentz pensó que el tiempo, local, t' al que tenía que recurrir no era más que una «cantidad matemática auxiliar» desprovista de significado físico; era un artificio puramente formal. Para él, el tiempo continuaba siendo tan universal como había pensado Newton, y la velocidad de la luz sólo tenía el valor c en el sistema en el que el éter electromagnético (en cuya realidad física él creía firmemente) estaba en reposo.

§3. La relatividad especial

Fue Albert Einstein, entonces todavía empleado de la Oficina de Patentes de Berna, quien modificó radicalmente no tanto el resultado final de Lorentz —sus transformaciones— como la manera en que las dedujo e interpretó. Lo hizo en 1905, en un artículo que publicó en la revista *Annalen der Physik* titulado «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento».

Para eliminar las discrepancias que habían surgido entre la mecánica newtoniana y la electrodinámica maxwelliana, plasmadas en experimentos como el de Michelson

y Morley, Einstein siguió un camino muy diferente al de Lorentz: construyó una teoría basada en dos postulados básicos. El primero, «principio de relatividad» —presente ya en la mecánica de Newton—, mantiene que las leyes de la física no se ven afectadas por el hecho de que se las describa en sistemas de referencia inerciales diferentes, mientras que el segundo, «constancia de la velocidad de la luz», afirma que la velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales; esto es, que es independiente del estado de movimiento del cuerpo que la emite, una suposición profundamente contraintuitiva y que violenta a la física newtoniana.

En otras palabras, las leyes de la física, argumentaba Einstein, son las mismas para todos los marcos inerciales de referencia, y no hay que optar por uno de ellos como el principal. La igualdad de todos explicaba la uniformidad del conjunto. Y la velocidad de la luz en el vacío es constante para todos los observadores. La luz es una magnitud máxima pero finita; ninguna suma de velocidades puede superarla.

Combinando ambos postulados, Einstein no sólo dedujo las mismas ecuaciones de transformación que había introducido Lorentz, sino que también sostuvo, y así lo escribía en su artículo, que «la introducción de un “éter luminífero” demostrará ser superflua en tanto que la visión desarrollada aquí no requiere de un “espacio absoluto estacionario”». Aunque en buena medida todo había comenzado a partir del éter-campo electromagnético, resultaba que, al menos para ciertos aspectos, éste no era necesario.

La lectura del artículo de Einstein impresiona aún hoy, más de un siglo después. Y lo hace por su claridad y limpieza argumentativa, además, por supuesto, de por su originalidad. Comenzaba con unas consideraciones generales, de naturaleza, podríamos decir, estética:

Es sabido que la electrodinámica de Maxwell —tal y como se entiende actualmente— conduce a asimetrías que no parecen inherentes a los fenómenos, cuando se aplica a cuerpos en movimiento. Tómese, por ejemplo, la acción electromagnética recíproca entre un imán y un conductor. El fenómeno que aquí se observa depende únicamente del movimiento relativo

entre el conductor y el imán, mientras que la visión habitual establece una aguda distinción entre los dos casos en que uno u otro de estos cuerpos está en movimiento. Ya que si el imán está en movimiento y el conductor en reposo, entonces aparece en los alrededores del imán un campo eléctrico con una cierta energía definida, que produce una corriente en aquellos lugares donde se encuentran partes del conductor. Pero si el imán está en reposo y el conductor en movimiento, no surge ningún campo eléctrico en los alrededores del imán. Sin embargo, en el conductor encontramos una fuerza electromotriz, para la que no existe la energía correspondiente, pero que da lugar —suponiendo que el movimiento relativo es el mismo en los dos casos discutidos— a corrientes eléctricas del mismo sentido e intensidad que las producidas por las fuerzas eléctricas en el caso anterior.

No podía ser correcto, estaba afirmando Einstein, explicar de manera diferente, en base teórica, fenómenos en los que intervienen dos elementos, que se mueven entre sí, dependiendo de que consideremos que sea uno el que se mueve con respecto al otro, o viceversa. Y tras esta introducción metodológica, añadía: «Ejemplos de esta especie, junto a los intentos fracasados de descubrir un movimiento de la Tierra con respecto al “medio de la luz”, sugieren que los fenómenos electromagnéticos, lo mismo que los mecánicos, no poseen propiedades que corresponden a la idea de reposo absoluto».

Tras la «Introducción», venía una «Parte cinematográfica» que comenzaba con una sección titulada «Definición de la simultaneidad», en la que Einstein describía de manera operacional los conceptos «sistema de referencia inercial» y «posición con respecto a un sistema de referencia inercial», pasando a continuación a señalar que, como las coordenadas de un punto material en movimiento son funciones del tiempo, tenía que explicar qué se entendía por tiempo. Era entonces cuando argumentaba que el concepto de «simultaneidad» no es absoluto, y daba una definición operacional de tiempo basada en la «sincronización de relojes».

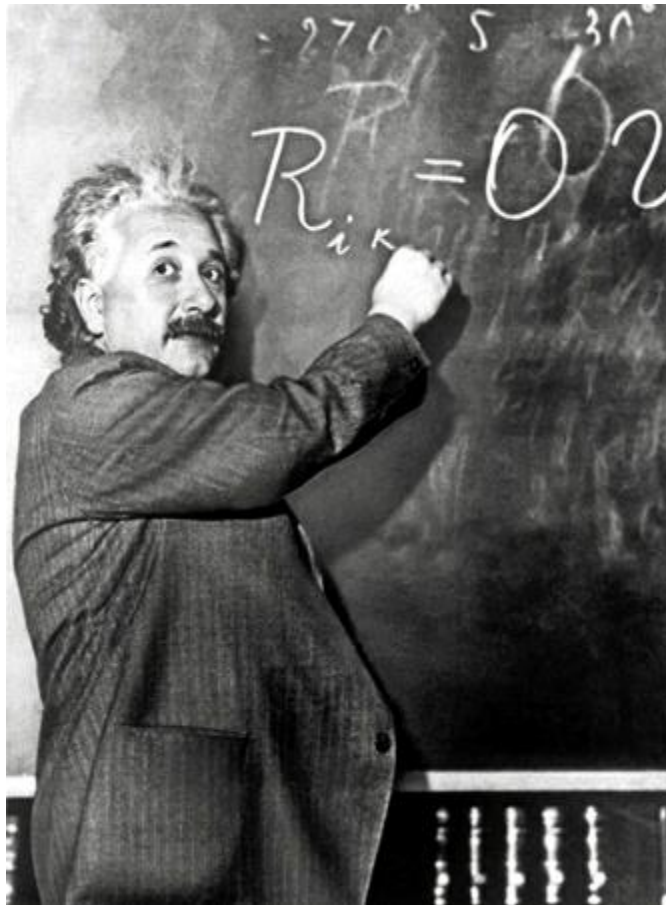
El procedimiento que siguió fue considerar dos relojes en reposo respecto a dos

puntos, A y B , de un sistema de referencia inercial; entonces se emitía un rayo de luz desde A en el instante t_A , rayo que es recibido por un observador colocado en B en t_B , reflejándolo instantáneamente de vuelta a A , a donde llegaba en el instante t'_A . Einstein definía entonces t_B de manera que

$$t_B - t_A = t'_B - t'_A$$

es decir

$$t_B = \frac{1}{2} (t_A + t'_A)$$



Albert Einstein, escribiendo una de las ecuaciones de la teoría general de la relatividad

No suponía, en definitiva, que existiese un tiempo absoluto. Utilizando estos

resultados, en la siguiente sección («Sobre la relatividad de longitudes y tiempos») demostraba que tanto longitudes como tiempos eran magnitudes relativas: «Observadores que se mueven [entre sí] encontrarán, por tanto, que sus relojes no están sincronizados, mientras que observadores en un mismo sistema declararán que sí lo están».

A continuación, utilizando los dos postulados básicos (principio de relatividad y constancia de la velocidad de la luz), Einstein deducía las ecuaciones que relacionaban las coordenadas espaciales y la temporal de dos sistemas de referencia inerciales, encontrando las mismas a las que había llegado Lorentz, con las cuales se podía comprobar fácilmente que longitudes e intervalos temporales dependían, efectivamente, del sistema de referencia inercial en el que se realizaban las medidas: surgían así fenómenos (que en su momento se observarían) como la dilatación del tiempo (relojes que se mueven más lentamente que los de otro observador en movimiento) o la citada contracción de la longitud (todos los observadores consideran que las demás reglas de medida son más cortas que la suya). Y también concluía que la clásica ecuación newtoniana de suma de dos velocidades, v y w , no era $(v + w)$, sino

$$[v + w]/[1 + (v \times w)/c^2]$$

donde c representa la velocidad de la luz. Si se toma $v = c$ y $w = c$, entonces se comprueba que su suma no es $2c$ sino c , como exigía la teoría.

Naturalmente, la nueva teoría einsteiniana convergía con la newtoniana en ciertos límites: cuando las velocidades implicadas eran pequeñas comparadas con la de la luz, un dominio en el que la mecánica de Newton había probado su eficacia durante más de dos siglos. Pero cuando se acercaban a la velocidad de la luz, las diferencias resultaban espectaculares.

Una vez establecido todo esto, se abría una segunda parte («Parte electrodinámica»), en la que Einstein demostraba que los requisitos cinemáticos que había establecido eran consistentes con la electrodinámica maxwelliana, que no

la afectaban en absoluto. En este sentido, se podía decir que la electrodinámica era una teoría relativista, y que ésta (que hasta 1907 no sería denominada «teoría de la relatividad especial») era previa, un conjunto de requisitos cinemático-geométricos que deberían cumplir todas las teorías, todas las dinámicas físicas (las que hablan de fuerzas e interacciones).

Al asignar un significado físico real a las contracciones y dilataciones espaciales y temporales, la relatividad especial socavaba drásticamente conceptos hasta entonces firmemente afincados en la física, abriendo el camino a que poco después el matemático Hermann Minkowski (1864-1909), que había sido profesor de Einstein en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, introdujese, utilizando la teoría einsteniana, el concepto, matemático y físico, de espacio-tiempo cuatridimensional, que el propio Minkowski presentó de manera pública con singular fuerza y dramatismo el 21 de septiembre de 1908, ante el Congreso de Científicos y Médicos Alemanes reunidos en Colonia: «A partir de ahora», manifestó en aquella ocasión, «el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y solamente una especie de unión de los dos conservará su independencia».

Básicamente, lo que hizo Minkowski fue redefinir la teoría de Einstein mediante la sustitución del espacio y el tiempo absolutos y separados de Newton por una nueva magnitud, el espacio-tiempo, al añadir a las tres coordenadas espaciales una cuarta dimensión temporal. Un punto del espacio-tiempo correspondía a un acontecimiento, no a un fenómeno. El experimento describía el movimiento en un punto y un momento únicos y determinados, el intervalo espacio-tiempo entre dos acontecimientos era el equivalente a la distancia entre dos puntos en Euclides, y la sucesión de los puntos que representan la trayectoria en el espacio-tiempo recibe la denominación de «línea de universo».

«Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento» llegó a la redacción de los *Annalen der Physik* el 30 de junio de 1905, siendo publicado en el número que apareció el 26 de septiembre; un día después, el 27, llegaba a la misma redacción otro artículo de Einstein (que se publicaría el 21 de noviembre) titulado «¿Depende

la inercia de un cuerpo de su contenido energético?». En él, el empleado de la Oficina de Patentes presentaba un mero corolario de la teoría de la relatividad especial, que se condensa en una sencilla expresión matemática, $E = m \times c^2$ (en donde E representa la energía, m la masa y c , como ya sabemos, la velocidad de la luz), que permitió comprender inmediatamente la razón de la aparentemente inagotable energía producida en los fenómenos radiactivos. Demostró, asimismo, que la masa de un cuerpo crece en la medida en que la velocidad del movimiento se acerca a la de la luz. Este resultado, como él mismo señaló, abría la posibilidad de entender la sorprendente propiedad de los elementos radiactivos, que emitían energía sin aparente pérdida de masa.

El mismo hecho de que Lorentz llegase a un elemento muy importante de la teoría de la relatividad especial ya indica que en más de un sentido ésta se encontraba «en el aire», que más pronto que tarde habría sido desarrollada de manera completa. Esto se ve con particular claridad en el caso de Henri Poincaré.

El 5 de junio de 1905, Poincaré presentó en la Académie des Sciences de París, de la que era distinguido miembro, un breve artículo titulado «Sobre la dinámica del electrón». Se trataba, en realidad, de un resumen de otro mucho más extenso que aparecería —con el mismo título— el año siguiente en una revista italiana de prestigio entre los matemáticos: *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*. Ambos artículos fueron escritos sin ningún conocimiento de los trabajos de Einstein; de hecho, el del *Rendiconti* fue enviado el 13 de julio de 1905, antes, por consiguiente, de que apareciese en *Annalen der Physik* el de Einstein. En este artículo de Poincaré se encuentran la mayoría de los resultados —no confundir con enfoque— a los que llegó aquél, y también los de Lorentz. Algunos más, de hecho, puesto que Poincaré también presentaba una formulación cuatridimensional —a la manera de como lo haría después Minkowski, aunque de forma más abstracta, menos intuitivamente geométrica— de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. Incluso se planteaba Poincaré la cuestión de desarrollar una teoría de la gravitación que fuese compatible con las transformaciones de Lorentz. Ahora bien, en realidad Poincaré no hizo lo mismo que Einstein. Y no lo hizo porque fue

incapaz de ir más allá del electromagnetismo maxwelliano. No se dio cuenta realmente, aunque estuvo muy cerca, de que la relatividad especial es previa a la teoría de Maxwell, y que únicamente por una circunstancia histórica se disponía de ella antes de que se hubiese formulado la relatividad especial. Si se prefiere decirlo de esta forma: existía una teoría relativista —la electrodinámica— antes de que se tuviese conciencia de la existencia de algo como la relatividad especial.

§4. La teoría de la relatividad general

Al contrario que la teoría de la relatividad especial, cuya estructura básica fue desarrollada por Einstein en forma definitiva en un único trabajo, la relatividad general —la teoría relativista de la gravitación que sustituyó a la teoría de la gravitación universal de Newton (1687)— exigió un periodo mucho más largo para su elaboración, aproximadamente de 1911 a 1915, aunque ya en 1907 Einstein formulase la esencia del problema. Aquel año Johannes Stark —que años más tarde, siendo un ferviente nazi, se opondría agriamente a Einstein y a sus teorías— pedía a Einstein que escribiese un artículo para la revista *Jahrbuch der Radioaktivitat und Elektronik*, de la que era editor, en el que recopilase todo lo referente al «principio de relatividad». En una de las secciones de este artículo, Einstein escribía: «Hasta ahora hemos aplicado el principio de relatividad —es decir, la suposición de que las leyes de la naturaleza son independientes del estado de movimiento del sistema de referencia— solamente a sistemas de referencia no acelerados. ¿Es concebible que el principio de relatividad sea válido también para sistemas acelerados entre sí?».

El problema era evidente y, por consiguiente, Einstein no podía abstenerse «de tomar posición en esta cuestión». Para ello pasaba a considerar dos sistemas de referencia en movimiento, S y S' , suponiendo que el primero estaba acelerado en la dirección del eje x , y que g era el valor (constante) de esta aceleración. Señalaba:

Supongamos que S' está en reposo, pero situado en un campo gravitacional homogéneo, que imparte una aceleración — g en la dirección del eje x a todos los objetos. Por lo que sabemos, las leyes físicas con respecto a S no

difieren de aquellas con respecto a S'; esto proviene del hecho de que todos los cuerpos son acelerados de la misma forma en un campo gravitacional [experimento de Galileo]. Por consiguiente, en base a nuestra experiencia actual, no tenemos ninguna razón para suponer que los sistemas S y S' puedan ser distinguidos entre sí de alguna manera, y por tanto supondremos que existe una equivalencia física completa entre el campo gravitacional y la correspondiente aceleración del sistema de referencia.

Vemos cómo en estos párrafos Einstein relacionaba la descripción teórica de la interacción gravitacional con su deseo de generalizar el principio de relatividad especial, de manera que englobase una clase más amplia de sistemas de referencia que los inerciales. El vínculo de unión es un hecho que descubrió Galileo, y que se asocia a un experimento que probablemente no llevó a cabo, dejar caer dos cuerpos de masas diferentes desde la torre inclinada de Pisa; un hecho que aparece como una no explicada coincidencia en la mecánica newtoniana: que la caída de graves hacia la superficie de la Tierra es independiente de la masa, o, lo que significa lo mismo, la igualdad entre la masa inercial y la masa gravitacional.

Basándose en esta relación, Einstein imaginó un experimento en el que se daban dos situaciones diferentes: una persona en el interior de un ascensor en reposo situado (encima) en las proximidades de un campo gravitacional, y otra en el mismo ascensor, pero éste con un movimiento acelerado igual pero de sentido contrario al de la atracción gravitacional del otro caso, y libre de cualquier fuerza gravitacional. Gracias a la igualdad de masas galileana, ninguna de las dos personas podría decir si, cuando suelta un objeto que tiene en la mano, éste se mueve hacia sus pies debido a la fuerza de la fuente gravitatoria o a que el ascensor se desplaza hacia arriba. A esta equivalencia (local) entre campos gravitacionales y sistemas de referencia acelerados Einstein la denominó «principio de equivalencia» y fue la única pieza de todas las que formaban su rompecabezas gravitacional que en ningún momento abandonó durante los años que empleó en buscar una teoría de la relatividad general.

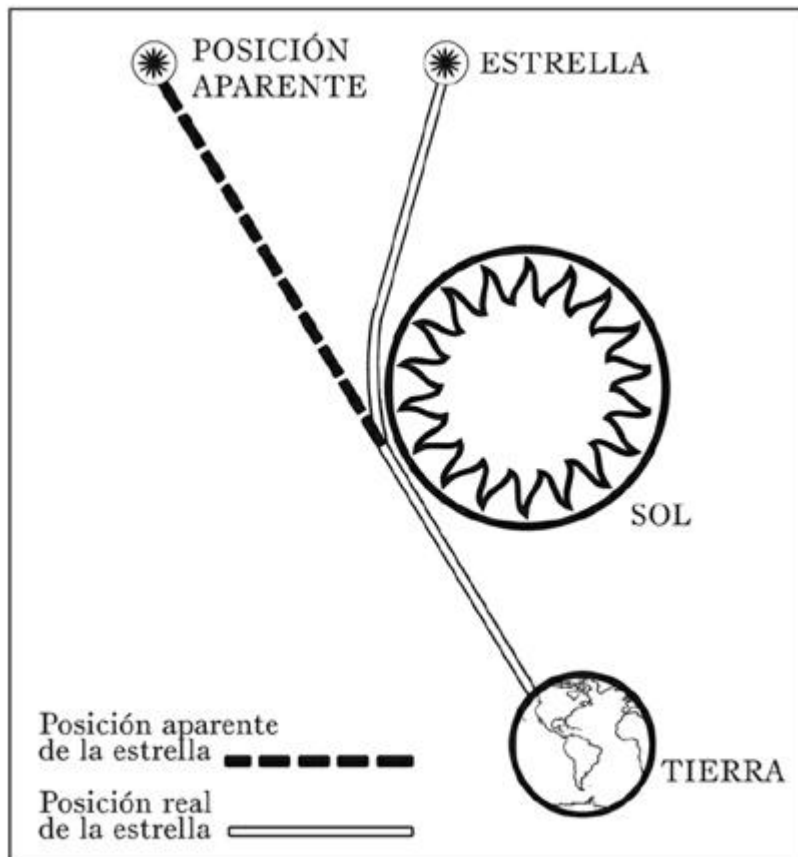
Fue precisamente explotando el principio de equivalencia (en el caso ideal de un disco que gira con velocidad angular uniforme) cuando Einstein se dio cuenta, en 1912, de que la teoría relativista de la gravitación que buscaba debería edificarse sobre un substrato geométrico curvo, o, en otras palabras, que los campos gravitacionales curvan el espacio-tiempo relativista. Expresado de otra manera, Einstein llegó a la conclusión de que la teoría relativista de la gravitación que buscaba debía basarse en un espacio-tiempo cuya geometría dependiese de su contenido energético-material. Sería, en consecuencia, no sólo una variedad métrica, sino también una de geometría variable, no prefijada e inmutable como sucedía con todas las teorías físicas conocidas hasta entonces (y después, hasta la fecha). Más aún, el objeto matemático que describía esa geometría debía ser el mismo que el que describiese la fuerza gravitacional. En este sentido, la gravitación se geometriza; se incluía, subsumía, la gravitación en la geometría. Y como la geometría está definida en todos los puntos del sistema al que hace referencia, la conclusión inevitable era que la nueva teoría relativista de la gravitación tenía que ser una teoría de campos; esto es, una construcción teórica cuyo objeto básico es una función.

En este punto, hay que señalar que no habría sido posible desarrollar la teoría de la relatividad general si no hubiese sido porque se disponía de las geometrías no euclidianas desarrolladas durante el siglo XIX. Una vez que Einstein dio el paso de identificar la geometría curva, riemanniana, como el soporte geométrico adecuado para construir una teoría relativista de la gravitación, ayudándose del cálculo diferencial absoluto (en especial de una memoria que Gregorio Ricci y Tullio Levi-Civita publicaron en 1901: «Métodos del cálculo diferencial absoluto y sus aplicaciones») e identificando geometría con campo gravitacional, tardaría todavía dos años más en llegar a las ecuaciones finales del campo gravitatorio, en un proceso en el que la heurística matemática fue cada vez más importante para él, frente a los argumentos físicos. El 25 de noviembre de 1915 Einstein presentaba a la academia su teoría general de la relatividad; esto es, las ecuaciones del campo gravitacional.

Dada la naturaleza de la nueva teoría y, en particular, del aparato matemático que utilizaba (el cálculo diferencial absoluto, o geometría diferencial; además, las ecuaciones del campo estaban formadas por un sistema de diez ecuaciones independientes en derivadas parciales no lineales), no todos los físicos podían comprenderla —lo que, por cierto, explica el elevado número de matemáticos que se interesaron por ella—, pero en general la gran mayoría pensaba que, aunque estuviese fuera de su alcance, constituía una aportación positiva al progreso de la física.

Inmediatamente (1916) después de establecida la teoría de la relatividad general, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild (1873-1916) encontró una solución exacta de las ecuaciones del campo gravitacional einsteiniano en una situación con simetría esférica que se podía asimilar al campo producido por el Sol, en el que se movían los planetas. De esa solución se deducían tres efectos observables: el desplazamiento del movimiento del perihelio (punto de una órbita más cercano al Sol) de un planeta, con respecto a la predicción newtoniana; la curvatura de los rayos de la luz en presencia de un campo gravitacional, y el desplazamiento hacia el rojo de las líneas del espectro electromagnético. Que el movimiento del perihelio de un planeta planteaba problemas a la teoría de la gravitación universal de Newton es algo que se sabía desde hacía mucho tiempo en el caso de Mercurio, y resultó que la desviación medida era precisamente la que se deducía de la solución de Schwarzschild. En cuanto a la segunda predicción, la de la curvatura de los rayos de luz (una novedad con respecto a la teoría de Newton, puesto que en ésta la gravedad afectaba a los cuerpos en función de su masa y, dado que la luz carecía de masa, no se veía afectada por la gravedad, por lo que debía propagarse en línea recta), se comprobó en 1919, durante una expedición británica dirigida por Frank Dyson, el astrónomo real inglés, y Arthur Eddington, catedrático de Astronomía en Cambridge, para observar desde la isla Príncipe, en África, y desde Sobral, en el norte de Brasil, un eclipse de Sol que tuvo lugar el 29 de mayo (es durante un eclipse cuando se pueden fotografiar rayos procedentes de estrellas que pasan por las cercanías de la superficie solar, que es donde es más intensa la gravedad y, por

consiguiente, el efecto predicho por la relatividad general). Los resultados de aquella expedición, que confirmaban las predicciones de la teoría de la gravitación einsteiniana, fueron anunciados en Londres el 6 de noviembre de 1919, en una reunión conjunta de la Royal Society y la Royal Astronomical Society. El día siguiente, la noticia apareció en los periódicos y así Albert Einstein se convirtió en un personaje de fama mundial.



Curvatura de los rayos de luz en presencia de un campo gravitacional

En cuanto al desplazamiento de las líneas espectrales hacia las mayores longitudes de onda, hacia el rojo, el efecto era demasiado pequeño y tardaría bastante en ser detectado.

§5. Unificación (geométrica) de fuerzas

El dominio de aplicación de la teoría de la relatividad general era la interacción gravitacional, pero la gravitación no es la única fuerza que existe en el Universo: en la época en la que Einstein la desarrolló se conocía perfectamente la existencia de otra, la electromagnética, pero todavía no se habían identificado claramente, aunque existiesen indicios de ellas, las interacciones débil y fuerte. Era, por consiguiente, natural que Einstein se plantease incluir en el marco de la relatividad general también al electromagnetismo; esto es, geometrizar no sólo la fuerza gravitacional, sino también la electromagnética. Habida cuenta de que esa geometrización se llevaba a cabo utilizando el elemento básico de los espacios de Riemann, el tensor métrico, $g_{\mu\nu}$, para describir el campo gravitacional, la pregunta era si sería posible utilizarlo también para incluir al electromagnetismo. Y se encontró que no, que era preciso ir más allá de los espacios de Riemann, generalizarlos.

Sin embargo, no fue Einstein, ni ningún otro físico, el que tomó la iniciativa en este programa; quienes lo hicieron eran matemáticos. Estimulados por la aparición y el poder de la teoría de la relatividad general, algunos matemáticos analizaron los fundamentos de la geometría riemanniana. Así, en 1917 Gerhard Hessenberg y Tullio Levi-Civita publicaron sendos artículos en los que señalaban que la formulación natural de una geometría riemanniana se basaba en la noción de transporte paralelo infinitesimal de un vector, algo que también hizo el año siguiente el matemático holandés Jan Arnouldus Schouten. Conociendo estos trabajos, en 1918 Hermann Weyl (1885-1955) resaltó que, al transportar paralelamente un vector, el valor de su módulo (su longitud) depende del camino que se sigue en tal transporte, de manera que para describir un espacio que tomase en cuenta tal propiedad era necesario introducir un nuevo conjunto de funciones; esto es, que no bastaba para definirlo con el tensor métrico.

Weyl, un matemático permeable a la física y a la filosofía, escogió para presentar sus ideas geométricas un libro cuyo título ya expresa su relevancia para el tema de la presente lección: *Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen uber allgemeine Relativitätstheorie* (*Espacio-Tiempo-Materia. Conferencias sobre relatividad*

general). Con respecto a la generalización de la geometría riemanniana, Weyl escribía en esta obra:

Inducido por las sólidas inferencias de la teoría de Einstein a examinar de nuevo los fundamentos matemáticos, el presente autor hizo el descubrimiento de que la geometría de Riemann sólo llega a medio camino en lo que se refiere a alcanzar el ideal de una geometría infinitesimal pura. Todavía permanece por erradicar el último elemento de geometría 'a distancia', un residuo de su pasado euclideo. Riemann supone que también es posible comparar las longitudes de dos elementos de línea en puntos diferentes del espacio; en una geometría «de lo infinitamente próximo» no es permisible utilizar comparaciones a distancia.

Consecuencia de la generalización geométrica introducida, el nuevo espacio (al que muchos llaman en la actualidad «espacios de Weyl») necesitaba para quedar definido el tensor métrico $g_{\mu\nu}$, pero también un cuadrivector, Con estas nuevas cuatro variables, Weyl argumentaba que podía introducir —esto es, «geometrizar»— el campo electromagnético.

Aunque inicialmente se mostró maravillado por el enfoque de Weyl, enseguida Einstein encontró puntos (consecuencias físicas) con los que estaba en desacuerdo, pero no olvidó la lección que el ejemplo del intento de aquél implicaba: nuevas matemáticas, generalizaciones de los espacios riemannianos que había utilizado para la relatividad general, podían abrir el camino para resolver el problema que siguiendo a Hilbert y a Weyl él también asumió: encontrar una teoría geométrica unitaria de la gravitación y el electromagnetismo. Una tarea, por cierto, a la que también se unió pronto Arthur Eddington, que en 1921 profundizó en la línea abierta por Weyl, y cuyas ideas influyeron bastante en Einstein.

Con todo, a la postre estos intentos de unificación de las fuerzas electromagnética y gravitacional fracasaron. Además, enseguida se vio que esas fuerzas no son las únicas que existen en la naturaleza: están también la interacción fuerte y la débil. Y así, la tarea de buscar la unificación de todas las fuerzas pasaría en su momento a

manos de los físicos cuánticos, y en ella siguen todavía.

Capítulo 15

Misteriosas partículas. Un mundo cuántico

Contenido:

§1. *El electrón*

§2. *Cuantización de la radiación*

§3. *Cuantización de la materia*

§4. *La mecánica cuántica*

§5. *La electrodinámica cuántica y física de «partículas elementales»*

§6. *Unificaciones*

§1. El electrón

Ya vimos que a comienzos del siglo XIX John Dalton sostuvo que las combinaciones químicas se efectúan a través de unidades discretas, átomo a átomo, y que los «átomos» de cada elemento son idénticos; Dalton calculó los pesos de esos átomos por comparación a la unidad, que atribuyó al hidrógeno. Otro momento importante en la exploración de la estructura de la materia tuvo lugar con el descubrimiento de la electrolisis; ahora bien, en sus estudios sobre este fenómeno Michael Faraday no entró en cuestiones atómicas. Tampoco científicos como Helmholtz o Maxwell, que se ocuparon de la posible estructura discreta de la corriente eléctrica, llegaron a conclusiones firmes. Fue Joseph John Thomson (1856-1940), director del laboratorio Cavendish de Cambridge, quien puso punto final a las incertidumbres y especulaciones acerca de si existían o no partículas portadoras de una carga eléctrica que se pudiese considerar unidad. Lo hizo mientras estudiaba la radiación catódica. En sus investigaciones, Thomson utilizó un tubo de cristal en el que se producían rayos catódicos y aplicó una diferencia de potencial entre dos placas paralelas, a través de las cuales pasaban aquéllos. Se producía entonces una desviación de los rayos, lo que significaba que se comportaban como partículas cargadas en campos eléctricos y magnéticos. A continuación, y aprovechándose de la fosforescencia que emitían cuando golpeaban

las paredes del cristal, medía cuánto se habían desviado los rayos de la línea horizontal que habrían seguido de no haberse aplicado la diferencia de potencial. Con este dato, y gracias a unas sencillas leyes electromagnéticas, deducía el valor del cociente entre la carga y la masa de las cargas que debían constituir los rayos. Utilizando diferentes gases en el interior del tubo, obtenía como valores para e/m : $0,4 \times 10^{-7}$, $0,5 \times 10^{-7}$ y $0,9 \times 10^{-7}$, en unidades C.G.S. electrostáticas.

Poco después pudo determinar, ya por separado, el valor de e , y como éste era el mismo, independientemente del metal que utilizase en el cátodo, la conclusión era obligada: se trataba de una partícula elemental universal, que formaba parte de toda la materia, y a la que siguiendo la terminología introducida por el físico irlandés Johnstone Stoney se terminó denominando *electrón*.

Los resultados obtenidos por Thomson permitieron ir más allá de la concepción daltoniana del átomo y explicar en términos físicos los conceptos y magnitudes químicos. Parecía que podía describirse la composición de la materia mediante combinaciones de un único corpúsculo. La idea que Thomson defendió era un modelo atómico conocido como el del «pastel de pasas», en el que los electrones se encontraban en el interior de «una esfera de electrización uniforme positiva que produce una fuerza atractiva radial en cada corpúsculo proporcional a su distancia al centro de la esfera». El átomo de hidrógeno lo representaba mediante una esfera cargada positivamente, de unos 10^{-8} cm de radio, con un electrón oscilando en el centro de la misma. A partir de ahí, para átomos con un número mayor de electrones, había que disponer éstos en el interior de la esfera correspondiente, de manera que estuviesen en equilibrio bajo la atracción que suponía la interacción con la carga positiva de la esfera, en la que se encontraban sumergidos, y la repulsión producida por los otros electrones con carga del mismo signo, todo teniendo en cuenta, naturalmente, el movimiento de los propios electrones. El mayor problema para este modelo era su estabilidad a medida que aumentaba el número de electrones, algo que, sin embargo, tal vez podría utilizarse para explicar los fenómenos radiactivos, idea que finalmente no tuvo éxito.

Fue Ernest Rutherford quien dio un paso realmente significativo con el modelo

atómico que propuso en 1911. Como vimos, en el curso de sus investigaciones en el dominio de la radiactividad, Rutherford se familiarizó con las partículas α (núcleos de helio) y β (electrones), que emiten las sustancias radiactivas. No es de extrañar, por consiguiente, que pensase que podría utilizarlas como herramienta de análisis atómico. En 1909, dos investigadores del laboratorio que entonces dirigía en Manchester, Hans Geiger y Ernest Marsden, lanzaban partículas a contra placas delgadas de diversos metales. Para sorpresa de todos, encontraron que la dirección de una pequeña fracción de las partículas a que llegaban a la placa era modificada de tal manera que volvían a aparecer de nuevo en el lugar de partida. A Rutherford le pareció que para que una partícula α cambiase su trayectoria en un ángulo de 90° o más hacían falta campos eléctricos mucho más intensos de los que podían suministrar los modelos atómicos que Thomson manejaba, y en abril de 1911 consiguió desarrollar una teoría que explicaba tanto las grandes como las pequeñas desviaciones observadas. El modelo atómico que utilizó consistía en un núcleo central (una esfera de menos de 3×10^{-12} cm de radio) que podía estar cargado positiva o negativamente, rodeado de «una esfera de electrificación», de unos 10^{-8} cm de radio, con la misma cantidad de carga, pero signo opuesto, que el núcleo.

El modelo atómico de Rutherford tenía grandes atractivos, pero también grandes inconvenientes. Si se pensaba en él como una especie de minisistema planetario gobernado por fuerzas electromagnéticas, entonces existía un problema obvio: los electrones que orbitaban en torno al núcleo estarían acelerados (su movimiento era circular) y, por tanto, deberían emitir radiación, lo que implicaba que perderían energía. Esto determinaría su progresivo acercamiento al núcleo, sobre el que terminarían cayendo irremediabilmente. En otras palabras, este modelo atómico carecía de estabilidad.

§2. Cuantización de la radiación

Cuando Rutherford encontró el modelo atómico que acabamos de mencionar, ya hacía más de una década que se había incorporado a la física una noción problemática, pero con una sólida base experimental: los cuantos. Éstos fueron

introducidos en 1900 por Max Planck (1858-1947), como consecuencia de un problema en el que estaba trabajando: deducir teóricamente la ley de radiación de un cuerpo negro que, como vimos en otro capítulo, había encontrado semiempíricamente unos pocos meses antes.

Incapaz de deducir la expresión utilizando los recursos de la física que él defendía a ultranza —esto es, una física basada en la mecánica newtoniana, la electrodinámica maxwelliana y la termodinámica, una física en la que el segundo principio de la termodinámica, el del crecimiento de la entropía, se cumpliera siempre, sin excepciones—, consiguió hacerlo finalmente recurriendo a la formulación estadística de la entropía propuesta por Ludwig Boltzmann en 1877. Combinando su ley de radiación con los procedimientos estadísticos de éste, Planck se vio obligado a tratar, como hipótesis según él «meramente formal», la energía de la radiación como si en lugar de ser una magnitud continua fuese discreta (lo que vino en denominarse «cuántica»). Al final de su proceso deductivo, para que la expresión matemática a la que había llegado coincidiese con la ley de radiación que había obtenido de modo semiempírico previamente, Planck concluyó que las unidades de energía, E , que constituían la radiación estaban descritas por la ecuación:

$$E = h \times \nu$$

donde h era una constante universal (que terminó siendo denominada «constante de Planck») y ν la frecuencia de la radiación.



Max Plank

A pesar de lo que sus resultados sugerían, Planck no creía en la realidad física de tal discontinuidad energética para la radiación. El único que pensó en ella para resolver algunos problemas de la física teórica fue un todavía desconocido Albert Einstein. El artículo, publicado como el de la relatividad especial en 1905, en el que profundizó en la cuantización de la energía se tituló «Un punto de vista heurístico acerca de la creación y transformación de la luz». En él, Einstein señalaba que «las observaciones asociadas con la radiación del cuerpo negro, fluorescencia, producción de rayos catódicos mediante luz ultravioleta y otros fenómenos relacionados, todos ellos conectados con la emisión o transformación de la luz», se entendían más fácilmente si se suponía que «la energía de la luz está distribuida espacialmente de forma discontinua». Expresado de otra forma, lo que Einstein estaba proponiendo es que para explicar ciertos fenómenos ya observados había

que suponer que la luz estaba formada por «partículas» independientes (que terminarían siendo denominadas «cuantos de luz» o con un término introducido más tarde por el químico-físico Gilbert N. Lewis, «fotones»), cada una de las cuales transportaba una energía determinada por la ley de Planck, $E = h \times \nu$. No ignoraba Einstein, por supuesto, que otros fenómenos físicos sólo se podían explicar sobre la base de entender la luz como una onda continua, pero para apoyar su tesis explicó teóricamente algunos efectos, como el fotoeléctrico, un fenómeno que había descubierto Heinrich Hertz en 1887. Lo que Hertz observó fue que, cuando incidía luz sobre una superficie metálica, ésta emitía «cargas» (identificables por la corriente eléctrica que se producía), pero que la energía de estas cargas (en el lenguaje actual, la velocidad de los electrones emitidos) no dependía de la intensidad de la luz incidente, sino de su longitud de onda.

Asociados a la luz, esto es, a la interacción electromagnética, los fotones son los cuantos, los objetos físicos que transmiten esta interacción. En el caso de otras interacciones, los cuantos correspondientes son diferentes.

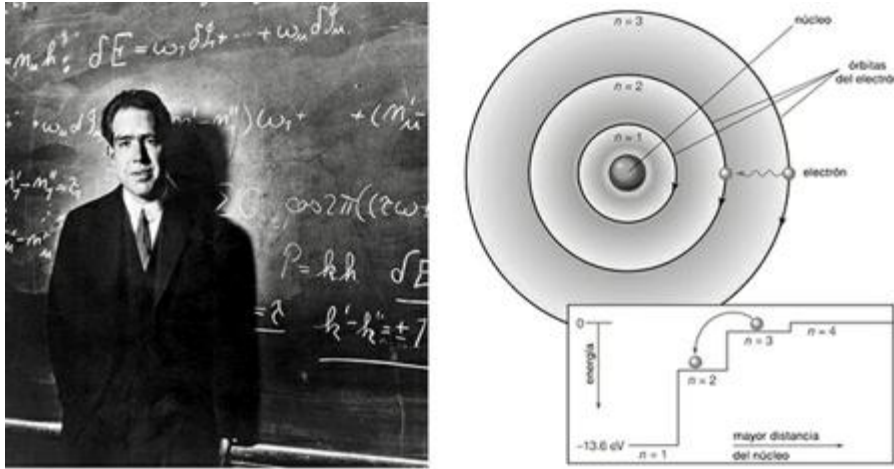
§3. Cuantización de la materia

Los trabajos de Planck y Einstein que hemos mencionado trataban de la radiación, no de la materia. En este sentido, se podía creer que la cuantización de la energía afectaba —si es que existía realmente— a la primera, no a la segunda. Sin embargo, el propio Einstein se encargó de demostrar que no era así, al aplicar los cuantos de Planck a la teoría de los calores específicos, lo que le permitió hallar expresiones que mejoraban las conocidas hasta entonces (ley de Dulong-Petit).

Aunque de esta manera los cuantos de Planck hicieron su entrada en el mundo de la materia, en realidad fue una entrada relativamente superficial, en la medida en que no afectó a la cuestión de encontrar un modelo atómico satisfactorio. Fue un joven físico danés, de nombre Niels Bohr (1885-1962), quien cambió todo esto.

Bohr se dio cuenta de que para construir un modelo adecuado de átomo tenía que incluir de alguna manera el cuanto de energía de Planck-Einstein. En el artículo de 1913 en el que presentó sus ideas («Sobre la constitución de átomos y moléculas»,

Philosophical Magazine) escribió: «Cualquiera que sea la modificación en las leyes del movimiento de los electrones, parece necesario introducir una cantidad ajena a la electrodinámica clásica; esto es, la constante de Planck $[h]$ ».



Niels Bohr y su modelo atómico (1913)

Para ello, consideró el átomo de hidrógeno formado por un núcleo de carga $+e$, en torno al cual gira, siguiendo una órbita circular y a una distancia r (a determinar), un electrón (carga $-e$). Combinando la mecánica clásica con la electrostática, suponiendo que en principio las órbitas eran estacionarias, esto es que no emitían radiación, e introduciendo una expresión que cuantizaba (que permitía sólo ciertos valores, múltiplos de h) el momento angular de las órbitas electrónicas, obtuvo, entre otras expresiones, una fórmula que daba r en función de h y de un número entero (el primer número cuántico introducido en la física cuántica). Por consiguiente, el radio de las órbitas no podía disminuir (ni aumentar) gradualmente, sino que debía hacerlo de manera discontinua, a saltos, cuánticamente. Se había eliminado la dificultad de la inestabilidad electromagnética del átomo de Rutherford.

Uno de los principales logros del modelo atómico de Bohr fue su capacidad para explicar las relaciones matemáticas correspondientes a diferentes grupos de líneas espectrales, que habían sido descubiertas «jugando con números» por Johann Jacob

Balmer y Johannes Robert Rydberg, relaciones que la física anterior a Bohr se había mostrado incapaz de definir. Lo que hizo fue calcular la energía que pierde un átomo cuando un electrón pasa de una órbita de energía superior a otra inferior, y a continuación suponer que esta energía es emitida bajo la forma de un cuanto de radiación, lo que significa que ese cambio de energía viene descrito por la fórmula de Planck. Igualando ambas expresiones, la de la variación de la energía y la de Planck, se obtiene otra que proporciona la frecuencia en función de un número entero (el asociado a cada una de las órbitas). En consecuencia, saltos electrónicos entre diferentes órbitas producen radiación de diferentes frecuencias (esto es, líneas espectrales). Espectroscopia y física cuántica unían sus caminos, al explicar ésta el origen de aquélla.

Con este modelo atómico fue posible explicar la estructura de la tabla periódica de los elementos, tarea en la que destacó el propio Bohr y para la que también fue importante disponer de un resultado obtenido en 1925 por el físico austriaco Wolfgang Pauli (1900-1958), el principio de exclusión, que afirma que no pueden existir dos electrones con los mismos números cuánticos (más tarde este principio se extendió a una familia de partículas, los fermiones, a la que, por cierto, no pertenecen los fotones, miembros de la familia de los bosones), algo fundamental para ordenar los electrones en las diferentes capas electrónicas.

§4. La mecánica cuántica

Aunque el propósito de Bohr era proporcionar una teoría general de la constitución de todos los átomos y moléculas, en la práctica su formulación solamente explicaba el átomo más elemental, el de hidrógeno. Todos sus intentos para ir más allá fracasaron; ni siquiera pudo extender su teoría al espectro del helio, con sus dos electrones. Transcurriría una docena de años antes de que se encontrase esa teoría. Entre todos los episodios de la historia de la ciencia en los que la gestación de una síntesis teórica aparece como un proceso largo y complejo, el de la génesis de una mecánica para las radiaciones y la estructura microscópica de la materia, de la mecánica cuántica, como terminó denominándose, sobresale como el más

trabajoso. Durante esa docena de años se sucedieron descubrimientos experimentales y desarrollos teóricos de todo tipo. Entre ellos destacaremos los experimentos de 1914 de James Franck y Gustav Hertz, y los de 1922 de Otto Stern y Walter Gerlach, que demostraban, respectivamente, la existencia de los estados estacionarios postulados por Bohr y la cuantización espacial (la existencia de direcciones privilegiadas); la generalización de Arnold Sommerfeld del modelo atómico de Bohr, empleando recursos procedentes de la relatividad especial (electrones que se movían con velocidades relativistas) y sustituyendo las órbitas circulares por elípticas (1916); la introducción (1916-1917) de las probabilidades en la dinámica cuántica por Einstein (los coeficientes de probabilidad espontánea o inducida en los cambios de niveles energéticos de los electrones); la formulación (1918) del principio de correspondencia a cargo de Bohr; las fórmulas semiempíricas de Alfred Landé para explicar el efecto Zeeman anómalo (1921); los multipletes descubiertos en Londres en 1922 por el español Miguel Catalán, que Sommerfeld utilizó inmediatamente para introducir un nuevo número cuántico; el experimento de 1923 de Arthur Holly Compton, que reafirmaba los aspectos corpusculares de la luz que Einstein había puesto en evidencia en 1905... y en los que muy pocos creían; la dualidad onda-corpúsculo (1923- 1924) de Louis de Broglie; la estadística desarrollada por Satyendra Bose y Einstein en 1924, que permitió por fin deducir satisfactoriamente la ley de radiación de Planck; la teoría cuántica de la dispersión (1924) de Hendrik Kramers; o el ya citado principio de exclusión (1925) de Wolfgang Pauli. Avances que culminaron en la formulación, en 1925, de una mecánica cuántica por un joven estudiante de Sommerfeld de 24 años, Werner Heisenberg (1901-1976).

Apoyándose en la idea que Einstein había utilizado en 1905 cuando desarrolló su teoría de la relatividad especial, según la cual las teorías físicas únicamente deben incluir elementos directamente relacionados con datos de la experiencia (una idea que el propio Einstein rechazaría más tarde), Heisenberg expresó la variable correspondiente a la posición como una serie de Fourier cuyos coeficientes tenían que ver con las amplitudes de las líneas de emisión y absorción atómicas, a su vez

relacionadas con las transiciones de un nivel energético del átomo a otro. Quería, como él mismo manifestó muchos años después, «renunciar a cualquier descripción de las órbitas electrónicas [...], reprimir conscientemente tal idea. Quería fiarlo todo a las reglas semiempíricas para la multiplicación de series de amplitudes, cuya validez se había probado en las teorías de la dispersión».

A finales de mayo 1925, en la isla de Helgoland, a la que se había trasladado para tratar la fiebre de heno que padecía, desarrolló un método para el cálculo de las amplitudes de transición entre diferentes niveles energéticos, y encontró que en las multiplicaciones de amplitudes que debía realizar $A \times B$ no era igual a $B \times A$. Sólo después se enteró por Max Born (1882-1970), director del Instituto de Física Teórica de la Universidad de Gotinga, de quien Heisenberg dependía entonces, de que lo que había estado haciendo, sin saberlo, era manejar y multiplicar matrices (conjuntos ordenados de magnitudes, en este caso, las diferentes amplitudes de transición entre niveles; el propio Born había utilizado matrices en 1921 en un artículo en el que estudiaba la teoría de redes de cristales). Cuando Born leyó el correspondiente manuscrito quedó fascinado. El artículo fue, por consiguiente, enviado para su publicación a la revista *Zeitschrift für Physik*, en la que apareció en 1925 bajo el título de «Reinterpretación teórico- cuántica de relaciones mecánicas y cinemáticas». Con él nació verdaderamente la mecánica cuántica; esto es, se dispuso por fin de la esencia de una teoría coherente para la dinámica de los procesos cuánticos.

La mecánica cuántica «matricial» (así se la denominó) contenida en aquel primer artículo estaba todavía por completar y formalizar. Tal tarea, en la que las habilidades matemáticas de Born, formado con los matemáticos David Hilbert y Felix Klein, fueron de gran ayuda, la realizó Heisenberg en colaboración con el propio Born y Pascual Jordan (1902-1980). El principal producto de aquella colaboración fue un artículo denominado posteriormente «de los Tres Hombres» (*Dreimännerarbeit*), publicado en 1926, en el que la mecánica matricial tomó su forma más acabada. Se trataba de una formulación altamente matemática y abstracta, en la que la imagen física de órbitas no figuraba entre los constructos de

la teoría. Y esto planteó serios problemas para muchos científicos, entre los que se encontraban algunas de las figuras más respetadas de la física germana, como Einstein y Planck, los «caballeros del continuo», como Heisenberg los llamaba con ironía en sus cartas a Pauli.

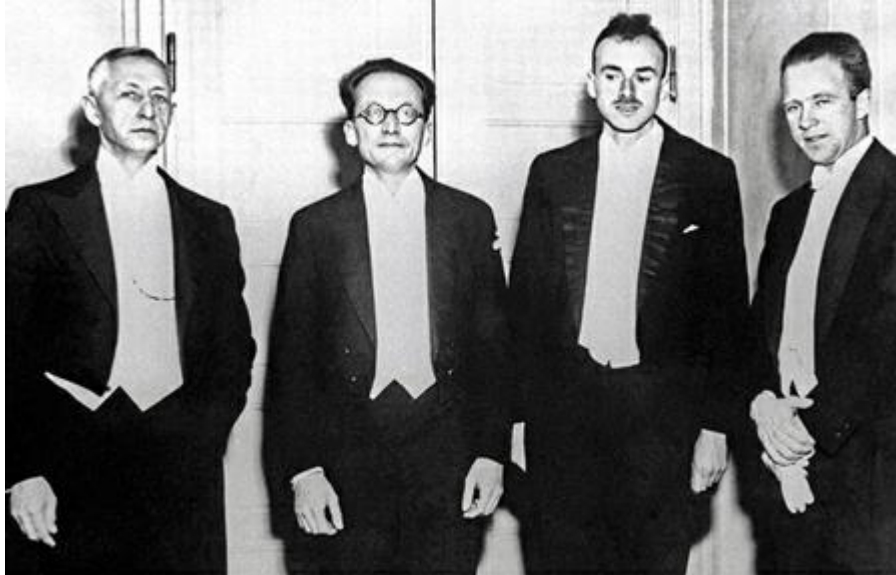
Teniendo en cuenta los sentimientos de repulsa y frustración que la nueva mecánica matricial suscitó en algunos físicos, se puede comprender el alivio que éstos experimentaron cuando el físico austriaco Erwin Schrödinger (1887-1961), que ocupaba una cátedra en Zúrich desde 1921, presentó, menos de medio año después del descubrimiento del formalismo matricial, una mecánica cuántica ondulatoria que prometía un retorno a la más familiar física de lo continuo, de los «campos», es decir, una teoría en la que se describían los fenómenos físicos en forma causal mediante ecuaciones en derivadas parciales en el espacio y en el tiempo.

Para llegar a esa mecánica ondulatoria, a Schrödinger le resultaron decisivos los resultados incluidos en la tesis doctoral que Louis de Broglie (1892-1987) presentó en la Sorbona el 29 de noviembre de 1924: *Investigaciones sobre la teoría de los cuanta*. Entre las conclusiones a las que llegó De Broglie destaca la propuesta (meramente teórica) de que, al igual que la luz, hasta entonces considerada una onda, puede comportarse con una partícula, los electrones pueden hacerlo como ondas. Más estrictamente, lo que De Broglie propuso es que un electrón con velocidad v lleva asociada una onda de longitud de onda λ igual a h/p , donde p es el momento lineal (esto es, el producto de la velocidad por la masa del electrón).

Una manera de entender el resultado de De Broglie era considerar que había obtenido la mecánica (ondulatoria, en tanto que asociaba ondas al movimiento de partículas) de electrones libres, que no interaccionaban. Desde semejante perspectiva se podía pensar que, siguiendo por el camino abierto, se llegaría a una mecánica cuántica, ondulatoria, general. Y entre los que creyeron en el enfoque del físico francés se encontraba Schrödinger.

En una serie memorable de artículos publicados en 1926 en la revista *Annalen der Physik* bajo el título de «Cuantización como un problema de autovalores», Schrödinger desarrolló esa mecánica cuántica ondulatoria. Un rasgo que distinguía

de entrada a la mecánica de Schrödinger de la de Heisenberg era su significado físico: al contrario que la mecánica matricial, la ondulatoria era más intuitiva.



El escritor Ivan Bunin, Erwin Schrödinger, Paul Dirac y Werner Heisenberg en Estocolmo (1933), con ocasión de la entrega de los Premios Nobel

Y en cuanto al aparato matemático, lejos del entonces poco conocido cálculo matricial, sus ecuaciones fundamentales eran las familiares ecuaciones en derivadas parciales, que tan bien recogía el recién publicado (1924) libro de Richard Courant y David Hilbert, *Methoden der mathematischen Physik (Métodos de física matemática)*.

Inicialmente, Schrödinger pensaba que las ondas cuyo comportamiento recogía su nueva mecánica permitían explicar qué eran partículas como el electrón: éste sería comparable a un paquete de ondas. La materia discreta se reduciría así a ondas continuas. Sin embargo, no tardó mucho en descubrirse que la interpretación de Schrödinger no se podía mantener. No obstante, esto no significaba que el formalismo de la teoría fuese incorrecto, tan sólo que había que descartar esa interpretación particular. Esto fue confirmado por el descubrimiento, debido al propio Schrödinger (y a otros, como Pauli), de la identidad matemática, formal, de

la mecánica ondulatoria (que resaltaba lo continuo) y la mecánica matricial (que destacaba lo discontinuo).

Al principio, los partidarios de la mecánica matricial no recibieron con agrado la idea de que la mecánica ondulatoria representaba, en el fondo, la misma realidad física. Heisenberg, en particular, fue muy reacio a aceptar la nueva formulación. Sin embargo, la versión de Schrödinger terminaría imponiéndose con bastante rapidez, debido a que resultaba fácilmente manejable. Y los antiguos proponentes del esquema alternativo terminarían también no sólo pasándose al bando contrario, sino contribuyendo a configurar su interpretación física, una interpretación que sería muy diferente a la que Schrödinger había deseado. Prominente en este sentido es la interpretación probabilista realizada por Max Born en 1926 de la función de onda, Φ (el objeto que describe en la mecánica cuántica ondulatoria los entes cuánticos), que consideraba $|\Phi|^2$ (esto es, el producto de la función de onda, que pertenece, matemáticamente, al campo de los números complejos, por su conjugado complejo) como una medida de la densidad de probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado representado por Φ . El viejo determinismo newtoniano sufría un ataque del que, en su esencia, nunca se recuperaría, aunque en la escala de nuestras percepciones funcione normalmente.

Y todavía quedaba algo peor para el mundo clásico newtoniano: el principio (o relaciones) de incertidumbre, que Heisenberg desarrolló en 1927. Las relaciones de incertidumbre afirman que magnitudes canónicamente conjugadas (como la posición y el momento, o la energía y el tiempo) sólo se pueden determinar simultáneamente con una indeterminación característica (la constante de Planck): $\Delta x \times \Delta p > h$, donde x representa la posición y p el momento lineal (igual al producto de la masa por la velocidad). A partir de este resultado, al final de su artículo Heisenberg extraía una conclusión con implicaciones filosóficas de largo alcance:

No hemos supuesto que la teoría cuántica es, al contrario de la física clásica, una teoría esencialmente estadística en el sentido de que sólo se pueden inferir conclusiones estadísticas de datos exactos [...]. En la

formulación fuerte de la ley causal «Si conocemos exactamente el presente, podemos predecir el futuro» no es la conclusión, sino más bien la premisa la que es falsa. No podemos conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles.

Y concluía:

En vista de la íntima relación entre el carácter estadístico de la teoría cuántica y la imprecisión de toda percepción se puede sugerir que detrás del universo estadístico de la percepción se esconde un mundo «real» regido por la causalidad. Tales especulaciones nos parecen —y hacemos hincapié en esto— inútiles y sin sentido. Ya que la física tiene que limitarse a la descripción formal de las relaciones entre percepciones.

El mismo año en el que Heisenberg dio a conocer el principio de incertidumbre, se publicaron, de manera independiente, dos artículos en los que sus autores anunciaban que habían demostrado experimentalmente que la predicción que Louis de Broglie había realizado en 1924 era correcta: los electrones también se comportaban como ondas. Ambos artículos se publicaron, separados por dos meses, en la revista inglesa *Nature*. El primero, «La difusión de electrones mediante un cristal de níquel», era debido a dos físicos estadounidenses, Clinton Davisson y Lester Germer, que trabajaban en los laboratorios que la Western Electric Compañía tenía en Nueva York, y el segundo, «Difracción de rayos catódicos mediante una película delgada», a George Thomson, hijo de J. J. Thomson, y Alexander Reid, de la Universidad de Aberdeen. Quedaba así establecido que la «solidez» de la materia, la idea tan firmemente arraigada en la percepción humana de que la materia posee una estructura definida, con límites claros, era al fin y al cabo errónea.

Con todos los elementos citados se elaboró lo que se denominó —por el papel destacado que desempeñó en su formulación y, acaso aún más, en su divulgación, Niels Bohr— «interpretación de Copenhague» de la mecánica cuántica. Expresado

brevemente, había que partir del hecho de que la función de onda que surge de la ecuación de Schrödinger está constituida por la suma de una serie de funciones, asociadas a las diferentes situaciones físicas posibles, multiplicadas cada una por un cierto valor (se trata, recordemos el título de los artículos de Schrödinger, de un problema de autovalores). En principio, si no se produce ninguna interferencia con el exterior, el sistema dado por la función de onda principal evoluciona de manera continua, regida por la ecuación de ondas de Schrödinger. Pero esta situación dominada por la continuidad, y en este sentido similar a la que se da en la física anterior, la física clásica, no se mantiene cuando se realizan medidas. Y en este punto hacía su entrada el observador, que en la física cuántica es, según la interpretación de Copenhague, especialmente importante. Expresado en términos de la función de onda, lo que se tiene es que, cuando se realiza una medida (o una observación), se produce un «colapso de la función de onda»; esto es, que —no sabemos cómo— el sistema, en principio una suma de todas las situaciones físicas (autofunciones de onda) posibles, elige una, se concreta en una situación determinada. Y lo único que la mecánica cuántica nos dice es la probabilidad de que se produzca una u otra de esas situaciones, una probabilidad asociada a los coeficientes que aparecen en cada uno de los sumandos que forman la función de onda completa.

La teoría cuántica toma así un carácter peculiar, surgido de la interferencia del observador (y sus útiles de medida) con el objeto físico que se investiga. El que el resultado de la observación dependa de la elección de la preparación del experimento (de la situación experimental) entra en conflicto, evidentemente, con el punto de vista de que el Universo «está ahí», independientemente de todos los actos de observación. No es sorprendente, por tanto, que la teoría cuántica informada a la manera de la interpretación de Copenhague fuese rechazada por algunos físicos, entre los que destacó Albert Einstein. En 1935, Einstein y dos de sus colaboradores, Boris Podolsky y Nathan Rosen, publicaron un artículo («¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad física?», *Physical Review*) en el que argumentaban que la mecánica cuántica no

podía ser una teoría completa, que era necesario introducir nuevas variables (variables ocultas) que restituirían la causalidad y así el carácter real de los fenómenos físicos que representaba. Aquel trabajo, al que inmediatamente respondió Bohr, abrió una larga historia, en la que destacaremos las contribuciones de un físico natural de Belfast que trabajaba en la División de Teoría del CERN, John Stewart Bell, quien demostró entre 1964 y 1966 que existían unas relaciones (desigualdades) que se podían emplear para decidir experimentalmente qué tipo de teoría era correcta, si una completa (que incluyese las variables ocultas para la formulación cuántica tan queridas para Einstein) que obedeciese a los requisitos que Einstein, Podolsky y Rosen habían planteado en 1935, o la mecánica cuántica tradicional. Provistos del análisis de Bell, en 1969 John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony y Richard Holt propusieron un experimento concreto para aplicar en él la prueba de las desigualdades de Bell. Se llevó a cabo en 1982 en el Instituto de Óptica Teórica y Aplicada de Orsay, en las cercanías de París, por un equipo dirigido por Alain Aspect. Y el resultado favoreció a la mecánica cuántica.

No hemos mencionado una tercera versión de la mecánica cuántica, entroncada con la que produjo Heisenberg, aunque más abstracta y algebraica, la protagonizada por el físico británico Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984). De hecho, si nos atenemos a una estricta cronología, la versión de Dirac fue formulada inmediatamente después de la de Heisenberg y antes de la de Schrödinger, ya que el primer artículo de Dirac (1925) sobre la misma se publicó, en los *Proceedings of the Royal Society*, el 1 de diciembre de 1925 (se había recibido el 7 de noviembre), mientras que Schrödinger introdujo su mecánica ondulatoria en un artículo que se recibió en *Annalen der Physik* el 27 de enero de 1926. Si no la hemos situado en el lugar que cronológicamente le corresponde es debido a que no mantuvo con las otras dos versiones la relación dialéctica que sostuvieron entre sí las de Heisenberg y Schrödinger. El rasgo más característico de la mecánica cuántica *à la* Dirac se encuentra en la utilización de estructuras formales que aparecen en la mecánica en su versión hamiltoniana, enriquecida con un rasgo que distingue la física clásica de la cuántica, el de que en ésta los observables y las variables dinámicas son

cantidades que no disfrutaban de la propiedad conmutativa de la multiplicación, como sí sucede en la física clásica.

§5. La electrodinámica cuántica y física de «partículas elementales»

La mecánica cuántica de Heisenberg, Schrödinger y Dirac abrió un nuevo mundo científico, pero no era en realidad sino el primer paso. Existían aún muchos retos pendientes, como, por ejemplo, hacerla compatible con los requisitos de la teoría de la relatividad especial, o construir una teoría del electromagnetismo, una electrodinámica, que incorporase los requisitos cuánticos. Si Einstein había enseñado, y la física cuántica posterior incorporado en su seno, que la luz, una onda electromagnética, estaba cuantizada, esto es, que al mismo tiempo que una onda también era una «corriente» de fotones, y si la electrodinámica que Maxwell había construido en el siglo XIX describía la luz únicamente como una onda, sin ninguna relación con la constante de Planck, entonces era evidente que algo fallaba, que también había que cuantizar el campo electromagnético.

No fue necesario, sin embargo, esperar a la segunda mitad del siglo XX para contar con una electrodinámica cuántica. Tal teoría, que describe la interacción de partículas cargadas mediante su interacción con fotones, fue construida en la década de 1940, de manera independiente, por un físico japonés y dos estadounidenses: Sin-itiro Tomonaga (1906-1979), Julian Schwinger (1918-1984) y Richard Feynman (1918-1988). Entre las novedades conceptuales de esta teoría, hay una que conviene señalar, por su contenido filosófico: la creación y aniquilación de partículas.

La electrodinámica cuántica representó un avance teórico considerable, pero tampoco significaba, ni mucho menos, el final de la historia cuántica; si acaso, ascender un nuevo peldaño de una escalera cuyo final quedaba muy lejos. En primer lugar porque cuando la teoría de Tomonaga-Schwinger- Feynman fue desarrollada ya estaba claro que además de las tradicionales fuerzas electromagnética y gravitacional existen otras dos: la débil, responsable de la existencia de la radiactividad, y la fuerte, que unía a los constituyentes (protones y

neutrones) de los núcleos atómicos. Por consiguiente, no bastaba con tener una teoría cuántica de la interacción electromagnética, hacía falta además construir teorías cuánticas de las tres restantes fuerzas. Ahora bien, la búsqueda de estas construcciones teóricas ha estado estrechamente asociada a una nueva disciplina científica, inicialmente denominada «física de partículas elementales», más tarde «física de altas energías».

En 1911 Rutherford había conseguido elaborar su modelo atómico ayudándose con un proyectil de cierta energía: las partículas α . Durante mucho tiempo estas partículas serían el único medio de perturbar de manera controlada el desconocido mundo del microcosmos, con el inconveniente de que para la producción de tales partículas-proyectiles se estaba a merced de elementos que fuesen radiactivos de manera natural. Esta situación comenzó a cambiar cuando John Cockcroft y Ernest Walton utilizaron un multiplicador voltaico que les proporcionó los 500 kV (1 kV = 1.000 voltios [V]) que necesitaron para ser los primeros en observar, en 1932, la desintegración artificial de átomos de litio en dos partículas α .

El mismo año que Cockcroft y Dalton llevaron a cabo su trabajo, se produjeron dos descubrimientos que mostraron que el mundo de las partículas elementales podría estar más poblado de lo que hasta entonces se suponía. El primero de estos descubrimientos tuvo lugar también en el laboratorio de Cambridge dirigido por Rutherford; su autor fue James Chadwick (1891-1974). Conocedor de los resultados de un experimento que habían realizado primero Walther Bothe y luego Irene y Frédéric Joliot-Curie, en el que habían bombardeado berilio con partículas α , observando que se emitía entonces una radiación de gran poder de penetración, que ellos consideraron (erróneamente) rayos γ , Chadwick repitió el experimento comprobando que esa «radiación penetrante» no era realmente una radiación, sino una partícula de carga cero (de ahí su capacidad de penetración y el nombre, «neutrón», que se le asignó), sobre la que su maestro, Rutherford, llevaba años especulando.

El segundo descubrimiento lo llevó a cabo el físico estadounidense Carl Anderson (1905-1991), y se trataba de una nueva partícula, el positrón, idéntica al electrón

salvo que su carga eléctrica era opuesta. El 2 de agosto de 1932, mientras fotografiaba trazas de rayos cósmicos utilizando una cámara de niebla (aparato inventado por Charles Wilson en 1897 que sirve para observar las trayectorias de partículas ionizadas), Anderson tomó una fotografía que sólo parecía poder ser interpretada suponiendo la existencia de una partícula con carga positiva y con una masa del orden de la que tenía el electrón. Estudios posteriores confirmaron esta hipótesis, que fue anunciada primero, aunque con precauciones, en un artículo publicado el 9 de septiembre de 1932 en *Science*, y luego, ya con más firmeza, en otro enviado a *Physical Review* en febrero de 1933 con un título que habla por sí sólo: «El electrón positivo».

En realidad, la existencia del positrón tenía raíces teóricas, relacionadas con la ecuación relativista del electrón que Dirac propuso en 1928. Esta ecuación reunía relatividad especial y teoría cuántica, explicando las propiedades del electrón, incluido el espín (una propiedad de las partículas elementales introducida en 1925 por los holandeses George Uhlenbeck y Samuel Goudsmit). El problema era que también incluía soluciones que correspondían a estados de energía negativa, ante los cuales Dirac no sabía qué decir, pero que finalmente se interpretaron como electrones de carga positiva, esto es, positrones, el primer ejemplo de antimateria, partículas que cuando chocan con su partícula contraria se aniquilan, produciendo energía.

El descubrimiento del neutrón y de la antimateria incidió directamente en cómo se entendió a partir de entonces el átomo. Hasta entonces se suponía que el núcleo — rodeado por electrones orbitando alrededor de él— estaba formado por protones y electrones. Que contenía electrones era algo que se suponía evidente, puesto que los elementos radiactivos emitían radiación β , esto es, electrones. Y si no estaban en el núcleo, ¿de dónde iban a surgir? Y en este punto entra en escena de nuevo Enrico Fermi, que en 1934 desarrolló una teoría para la «desintegración beta», el proceso en el que un elemento radiactivo emite electrones, una teoría que mejoraron en 1958 E. C. George Sudarshan y Robert Marshak, Richard Feynman y Murray Gell-Mann. En realidad, esta teoría trataba de la emisión β desde un punto

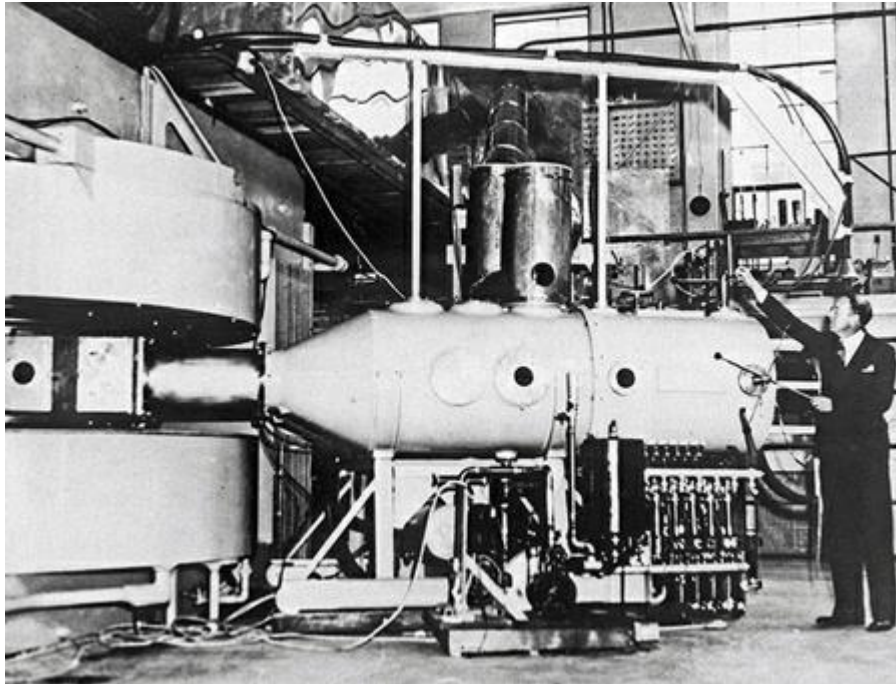
de vista más general: entendiendo este proceso como manifestación de una fuerza, o interacción, fundamental de la naturaleza, diferente a la electromagnética, la gravitacional y la fuerte (la que une los componentes de los núcleos atómicos), una interacción que, debido a su magnitud, se denominó «interacción débil». Lo que hizo Fermi fue proponer que un neutrón se desintegra dando lugar a un protón, un electrón y un antineutrino (la antipartícula del neutrino, una partícula propuesta en 1930 por Wolfgang Pauli para explicar el espectro continuo que se observaba en la energía de la radiación β emitida).

Con el bagaje del neutrón y la teoría de Fermi, fue posible suponer que en realidad los núcleos atómicos estaban formados por protones y neutrones, una suposición que permitía explicar otros resultados experimentales. De esta manera quedó establecido un nuevo modelo atómico, en el que las magnitudes atómicas esenciales eran dos: el número atómico, que es de los protones (2 en el helio, 26 en el hierro y 92 en el uranio), y la masa atómica, igual a la suma de las masas de los protones y neutrones que contiene. Como ya vimos, el número de protones es el mismo para cada elemento, en tanto el de los neutrones puede ser distinto del de los primeros. La suma de ambos es la masa atómica que distingue a los isótopos. El hidrogeno tiene tres formas, con masa 1, 2 y 3, que identifican al elemento común y a sus dos isótopos: deuterio y tritio. La neutralidad del átomo se debe a la igualdad de las cargas eléctricas, y la estabilidad del núcleo, a la igualdad del número de sus partículas.

Electrones, protones, neutrones y positrones no fueron sino algunos de los primeros «ciudadanos» de una jungla de partículas constituyentes de la materia y radiaciones cuyo número fue aumentando progresivamente gracias al desarrollo de la denominada «física de altas energías». El principal responsable de ese desarrollo fue Ernest Orlando Lawrence (1901-1958).

Después de graduarse en Yale, Lawrence fue contratado como profesor asociado de Física por Berkeley en 1928. El año siguiente, mientras ojeaba la revista *Archiv für Elektrotechnik*, se encontró con un artículo (que coincidía casi en su totalidad con su tesis doctoral de 1927) del ingeniero noruego Rolf Wideroe, estudiante de

doctorado en el Politécnico de Aquisgrán, cuyas ilustraciones (Lawrence sabía poco alemán) le sugirieron la idea del ciclotrón.



Ernest O. Lawrence con uno de sus ciclotrones

Lo que Wideroe había hecho era construir un tubo lineal para acelerar partículas dividido en dos partes y alimentado por una señal eléctrica alterna de 25.000 V. En esencia, lo que Lawrence hizo fue centrarse en geometrías circulares, que Wideroe había considerado en principio y descartado después. Pero con varios avances con respecto a las ideas del noruego; uno de ellos era la utilización de un campo magnético que permitía que las partículas se moviesen siguiendo trayectorias circulares. Haciendo que el campo eléctrico invirtiera su polaridad cada media vuelta para que el empuje tangencial fuera el adecuado, se conseguía que las partículas fuesen aumentando su energía con cada revolución. Naturalmente, al ir moviéndose más deprisa las partículas también irían describiendo círculos más amplios cada vuelta, pero independientemente de lo rápido que se movieran resultaba que siempre tardaban el mismo tiempo en cada revolución, lo que permitía mantener la misma frecuencia de inversión del voltaje, que así siempre

estaba en resonancia con los ciclos de la partícula. Este principio de resonancia fue en realidad lo que posibilitó la construcción del ciclotrón, un término este, por cierto, que Lawrence utilizó durante un tiempo de manera informal, prefiriendo en las notas más formales el de «acelerador de resonancia magnética» (hasta 1936 no se estableció como el nombre oficial).

Ahora bien, una cosa era la teoría y otra la realidad, y no fue fácil construir un ciclotrón que funcionase. En semejante tarea, Lawrence contó con la colaboración de sus estudiantes, especialmente con la de Stanley Livingston, que dedicó su investigación doctoral a este fin. A finales de 1930 Lawrence y Livingston completaban la construcción (en la que predominaba lo artesanal: el coste fue de unos 25 dólares) del primer ciclotrón: medía unos 12 cm de diámetro. El 2 de enero de 1931 lo probaron (aplicando un voltaje de 2.000 V), y alcanzaron con él proyectiles con energías de 80 kV. En febrero de 1932, y de nuevo con la ayuda de Livingston, lograba poner en funcionamiento el primer ciclotrón (de poco menos de 30 cm de diámetro) que alcanzaba 1.220.000 V. El mismo mes que entraba en funcionamiento el primer ciclotrón de Berkeley, Harold Urey (1893-1981) y sus colaboradores de la Universidad de Columbia, en Nueva York, demostraban la existencia de un isótopo (variedad de un elemento con el mismo número de protones y de electrones, pero no de neutrones) del hidrógeno dos veces más pesado que el ordinario, al que se llamó «deuterio».

En 1939, el año en que Alemania comenzó la Segunda Guerra Mundial, Berkeley ya contaba con un ciclotrón de metro y medio de diámetro en el que los electrones podían alcanzar los 16 MeV (1 MeV = 1.000 kV). Y en septiembre de ese año Lawrence anunciaba planes para construir uno nuevo que llegase a los 100 MeV. En diciembre recibía el Premio Nobel de Física por «la invención del ciclotrón», y en abril de 1940 la Rockefeller Foundation donaba 1,4 millones de dólares para la construcción de esa nueva máquina, el último de sus ciclotrones, que iba a tener más de 4,5 m de diámetro.

Los aceleradores de Lawrence sólo fueron el comienzo de lo que se convertiría en una larga carrera por construir otros cada vez más potentes; esto es, máquinas

capaces de acelerar con energías más elevadas las partículas que se hacían chocar con otras, para ver cuáles eran los productos, partículas, se suponía, más elementales. Y gracias a los nuevos aceleradores, el número de partículas elementales fue creciendo de tal manera que terminó socavando drásticamente la idea de que la mayoría pudiesen ser realmente elementales en un sentido fundamental. Entre las partículas halladas podemos recordar, por ejemplo, piones y muones de diversos tipos, o las denominadas Λ , W o Z , sin olvidar sus correspondientes antipartículas. El número —cientos— resultó ser tan elevado que llegó a hablarse de un «zoo de partículas», con una fauna demasiado elevada.

A ese zoo se unieron otras partículas particularmente llamativas: los *quarks*. Su existencia fue propuesta teóricamente en 1964 por los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig. Hasta su aparición en el complejo y variado mundo de las partículas elementales, se pensaba que protones y neutrones eran estructuras atómicas inquebrantables, realmente básicas, y que la carga eléctrica asociada a protones y electrones era una unidad indivisible. Los *quarks* no obedecían a esta regla, ya que se les asignó cargas fraccionarias. De acuerdo a Gell-Mann y Zweig, los hadrones, las partículas sujetas a la interacción fuerte, están formados por dos o tres especies de *quarks* y *antiquarks*, denominados *u* (*up*; «arriba»), *d* (*down*; «abajo») y *s* (*strange*; «extraño»), con, respectivamente, cargas eléctricas $2/3$, $-1/3$ y $-1/3$ la del electrón —de hecho, los hadrones pueden ser de dos tipos: bariones (protones, neutrones e hiperones) y mesones (partículas cuyas masas tienen valores entre la del electrón y la del protón)—. Así, un protón está formado por dos *quarks u* y uno *d*, mientras que un neutrón está formado por dos *quarks d* y por otro *u*; son, por consiguiente, estructuras compuestas. Posteriormente, otros físicos propusieron la existencia de tres *quarks* más: *charm* (*c*; 1974), *bottom* (*b*; 1977) y *top* (*t*; 1995). Para caracterizar esta variedad, se dice que los quarks tienen seis tipos de sabores (*flavours*); además, cada uno de estos seis tipos puede ser de tres clases, o colores: rojo, amarillo (o verde) y azul. Y para cada *quark* existe, claro, un *antiquark*. (Por supuesto, términos como los anteriores —color, sabor, arriba, abajo...— no representan la realidad que asociamos

normalmente a tales conceptos, aunque puede en algún caso existir una cierta lógica en ellos, como sucede con el color).

En definitiva, los *quarks* tienen color pero los hadrones no: son blancos. La idea es que sólo las partículas blancas son observables directamente en la naturaleza, mientras que los *quarks* no; ellos están confinados, asociados formando hadrones. Nunca podremos observar un *quark* libre. Ahora bien, para que los *quarks* permanezcan confinados deben existir fuerzas entre ellos muy diferentes de las electromagnéticas o de las restantes. En palabras de Gell-Mann: «Así como la fuerza electromagnética entre electrones está mediada por el intercambio virtual de fotones, los *quarks* están ligados entre sí por una fuerza que surge del intercambio de otros cuantos: los gluones (del inglés *glue*, pegar), llamados así porque hacen que los *quarks* se peguen formando objetos observables blancos como el protón y el neutrón».

Aproximadamente una década después de la introducción de los *quarks*, se desarrolló una teoría, la cromodinámica cuántica, que explica por qué los *quarks* están confinados tan fuertemente que nunca pueden escapar de la estructuras hadrónicas que forman. El nombre «cromodinámica» — procedente del término griego *chromos* («color») — aludía al color de los *quarks*, y el adjetivo «cuántica» a que es compatible con los requisitos cuánticos. Al ser la cromodinámica cuántica una teoría de las partículas elementales con color, y al estar éste asociado a los *quarks*, que a su vez tratan de los hadrones, las partículas sujetas a la interacción fuerte, concluimos que la cromodinámica cuántica describe esta interacción.

§6. Unificaciones

Con la electrodinámica cuántica y la cromodinámica cuántica, se disponía de teorías cuánticas para las interacciones electromagnética y fuerte. Además, se contaba con una teoría de la interacción débil, si bien ésta tenía problemas. Una versión más satisfactoria para una teoría cuántica de la interacción débil llegó cuando el estadounidense Steven Weinberg, en 1967, y el paquistaní (afincado en Inglaterra) Abdus Salam, el año siguiente, propusieron independientemente una

teoría que unificaba las interacciones electromagnética y débil. Su modelo incorporaba ideas propuestas en 1960 por Sheldon Glashow. Por estos trabajos, Weinberg, Salam y Glashow compartieron el premio Nobel de Física de 1979; esto es, después de que, en 1973, una de las predicciones de su teoría —la existencia de las denominadas «corrientes neutras débiles»— fuese corroborada experimentalmente en el CERN.

La teoría electro débil unificaba la descripción de las interacciones electromagnética y débil, pero ¿no sería posible avanzar por la senda de la unificación, encontrando una formulación que incluyese también la interacción fuerte, descrita por la cromodinámica cuántica? La respuesta, positiva, a esta cuestión vino de la mano de Howard Georgi y Glashow, que introdujeron en 1974 las primeras ideas de lo que vino en denominarse «teorías de gran unificación (GUT)».

Gracias al conjunto formado por ellas, se dispuso de un gran marco teórico para entender de qué está formada la naturaleza. Un marco teórico con una extraordinaria capacidad predictiva. De acuerdo con él, se acepta por una parte que las partículas elementales pertenecen a uno de los dos siguientes grupos: bosones o fermiones, según su espín sea entero o fraccionario (el fotón es un bosón y el electrón un fermión), que obedecen a dos estadísticas (maneras de contar agrupaciones de partículas de la misma especie) diferentes: la estadística de Bose-Einstein y la estadística de Fermi-Dirac. Por otra parte, se tiene que toda la materia del Universo está formada por agregados de tres tipos de partículas elementales: electrones y sus parientes (las partículas denominadas «muón» y «tau»), neutrinos (neutrino electrónico, muónico y tauónico) y *quarks*, además de por los cuantos asociados a los campos de las cuatro fuerzas que reconocemos en la naturaleza: el fotón para la interacción electromagnética, las partículas Z y W (bosones gauge) para la débil, los gluones para la fuerte y, aunque la gravitación aún no se ha incorporado a ese marco, los aún no observados gravitones para la gravitacional. El subconjunto formado por la cromodinámica cuántica y teoría electro débil —esto es, el sistema teórico que incorpora las teorías relativistas y cuánticas de las

interacciones fuerte, electromagnética y débil— es especialmente poderoso si tenemos en cuenta el balance predicciones-comprobaciones experimentales. Es el denominado «modelo estándar», que en julio de 2012 recibió un nuevo apoyo. Fue entonces, el 4 de julio concretamente, cuando se anunció que en el gran colisionador de hadrones (*Large Hadron Collider*; LHC) del CERN se había encontrado el denominado bosón de Higgs, cuya existencia había sido prevista teóricamente en tres artículos publicados en 1964, en el mismo tomo de la revista *Physical Review Letters*: el primero estaba firmado por Robert Brout y François Englert, el segundo por Peter Higgs y el tercero por Gerald Guralnik, Carl Hagen y Thomas Kibble. La importancia de este descubrimiento radica en que permite explicar el origen de la masa de las partículas elementales que aparecen en el modelo estándar: es el campo asociado al bosón de Higgs (recordemos la dualidad onda-corpúsculo, que significa que en la física cuántica una partícula se puede comportar como un campo y viceversa), que impregna todo el espacio, el que frena, por decirlo de alguna manera, a las partículas que tienen masa, mostrando éstas, mediante su interacción con el campo de Higgs, dicha masa. Así, el bosón- campo de Higgs explica la gran masa que poseen los bosones gauge W y Z, y también porque los fotones no tienen masa (no interactúan con el bosón de Higgs).

La formulación del modelo estándar es uno de los grandes logros de toda la historia de la física, uno que rivaliza con la mecánica cuántica. Pero, mucho más que la relatividad general y la mecánica cuántica, ha sido producto de un esfuerzo colectivo.

Ahora bien, no obstante su éxito, obviamente, el modelo estándar no es «la teoría final». Por una parte, porque la interacción gravitacional queda al margen, pero también porque incluye demasiados parámetros que hay que determinar experimentalmente. Se trata de las, siempre incómodas pero fundamentales, preguntas del tipo «¿por qué?». ¿Por qué existen las partículas fundamentales que detectamos? ¿Por qué son cuatro las interacciones fundamentales, y no tres, cinco o sólo una? ¿Y por qué tienen estas interacciones las propiedades (como intensidad o rango de acción) que poseen?

Existen candidatos para esa teoría final, como la denominada «teoría de cuerdas», pero todavía el problema está abierto.

Capítulo 16

Del caos al orden. El estudio del Universo

Contenido:

- §1. Descubrimientos astronómicos
- §2. Nuevos instrumentos astronómicos
- §3. La expansión del Universo
- §4. Origen y evolución del Universo
- §5. Cosmodiversidad
- §6. Nucleosíntesis estelar

§1. Descubrimientos astronómicos

Estudiar el Universo, identificar los objetos que contiene y las estructuras que se encuentran en él, es difícil. Con la invención a comienzos del siglo XVII del telescopio cambió lo que se podía observar, y en consecuencia decir, sobre los objetos celestes. Gracias al telescopio, Galileo descubrió los «planetas medíceos», denominación sustituida desde 1665 por la de «satélites», que en latín se usaba para referirse al compañero habitual o al miembro de la guardia personal. También observó estrellas antes nunca vistas y que la Vía Láctea no era una nube de polvo estelar, sino un conglomerado de estrellas. Casi un siglo y medio después, en 1750, el astrónomo inglés Thomas Wright publicó un libro, *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe (Una teoría original o nueva hipótesis sobre el Universo; 1750)*, en el que proponía que el Universo tenía la forma de un anillo o de una capa esférica en torno a un centro (establecido por Dios) hacia el cual eran atraídas las estrellas. A la Vía Láctea la consideraba la sección transversal de ese Universo, que vemos cuando miramos en la dirección de ese centro divino. Cinco años más tarde, Immanuel Kant sostuvo en un libro titulado *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels (Historia natural universal y teoría de los cielos; 1755)* que la Vía Láctea era un sistema con forma de disco que contenía, además de otras muchas estrellas, el Sistema Solar; esto es, la agrupación

gravitacional formada por el Sol y los planetas que giran en torno a él. De hecho, Kant fue más allá, proponiendo que esa estructura de disco había surgido de la misma forma que los propios planetas habían llegado a orbitar en torno al Sol casi en un mismo plano. Yendo todavía más lejos, compuso un modelo de Universo jerarquizado integrado por «universos isla»: planetas girando alrededor de estrellas como el Sol, estrellas formando galaxias, y galaxias que a su vez se agrupaban en grandes conjuntos. Todas estas unidades astronómicas se habrían ido formando a partir de la actuación de la fuerza gravitacional sobre una distribución caótica y gigantesca.

Además de la franja lechosa que es la Vía Láctea, se observaban otras masas luminosas que no se podían resolver en estrellas separadas y que fueron denominadas «nebulosas». El primer gran estudioso de estos sistemas fue Charles Messier, autor de un *Catalogue des nébuleuses et amas d'étoiles* (1771) que se podían observar desde París. Incluía 103, entre ellas una, la número 31, que sería después conocida como galaxia Andrómeda, la galaxia (espiral) más próxima a la Vía Láctea. También aparecía la nebulosa de Orión, conocida como M42 precisamente porque ocupa este número en el citado catálogo.

El que la galaxia, en realidad un conglomerado de estrellas, Andrómeda fuese tomada por una nebulosa es significativo: no estuvo claro durante mucho tiempo si las nebulosas eran nubes de polvo interestelar y gases o estrellas cuya existencia no se podía distinguir debido a la limitación de los telescopios disponibles. William Herschel, el excepcional constructor de telescopios reflectores y astrónomo, amplió la lista de Messier encontrando centenares de nebulosas distribuidas por el Universo. Entre los logros de William Herschel destaca que el 13 de marzo de 1781, utilizando un telescopio reflector de 12 m de largo y provisto de un espejo de 1,15 m de diámetro, viera lo que describió como «una estrella curiosa o quizás un cometa», que las noches siguientes se movió despacio entre las estrellas; cuando se calculó su órbita resultó ser un nuevo planeta, el séptimo — después de Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno— del Sistema Solar, al que se bautizó con el nombre de Urano.

La consecuencia más importante del descubrimiento de Urano llegó cuando se constató que no seguía la órbita que se predecía según la teoría newtoniana. En 1845 un astrónomo inglés, John Couch Adams, supuso la existencia de un planeta (el octavo del Sistema Solar), hasta entonces no observado, y calculó la masa que debería poseer y la trayectoria que tendría que seguir. Una vez hecho esto, Adams envió su predicción a la figura más prominente de la astronomía inglesa, el astrónomo real, *sir* George B. Airy, que disponía de los instrumentos necesarios para comprobar la idea de su compatriota, pero Airy no le hizo caso. Perdieron una gran oportunidad, ya que al otro lado del canal de La Mancha, otro astrónomo, Urbain Jean Joseph Leverrier, tuvo la misma idea que Adams. El 18 de septiembre de 1846, Leverrier completó sus cálculos. Inmediatamente escribió a Johann Galle, del observatorio de Berlín, informándole de sus resultados y pidiéndole que buscara en una posición determinada el hipotético planeta. Al contrario que Airy, Galle se tomó en serio la idea, y el 23 de septiembre lo encontró. Fue bautizado con el nombre de Neptuno, el dios romano del mar.

§2. Nuevos instrumentos astronómicos

Imposibilitados por falta de recursos teóricos y experimentales de avanzar en el estudio del conjunto del Universo, el cálculo de las dimensiones y distancias del Sistema Solar, así como el conocimiento de la figura y composición de los cuerpos celestes fueron los problemas fundamentales a los que se enfrentaron los astrónomos posteriores a Newton, quien, eso sí, les había provisto de un útil teórico particularmente adecuado para el estudio del Sistema Solar. Aun así, en más de un apartado, especialmente el de los recursos para medir distancias celestes, aquellos astrónomos no fueron mucho más allá que los antiguos. La superación de estas limitaciones llegó de la mano del desarrollo tecnológico, especialmente, en el siglo XIX, con novedades como el espectrómetro y la cámara fotográfica, que sustituyeron la observación directa y momentánea por las imágenes fijas del primero y la fotografía de la segunda.

De la espectroscopia ya nos ocupamos en el capítulo dedicado a las radiaciones, no

así de la fotografía, que proporcionó imágenes ópticas que podían observarse repetidamente para apreciar los cambios en el tiempo. La primera «fotografía» de la Luna, un daguerrotipo, data de 1840 y se debe a John William Draper, un fisiólogo americano que utilizó una exposición de 20 minutos. Diez años después se obtuvo el de una estrella (Vega). En 1874 se obtuvieron imágenes del tránsito de Venus en colodión, además de en daguerrotipos. Las nuevas placas de bromuro de plata proporcionaron las primeras fotografías de calidad de Júpiter y Saturno en 1879-1886, al tiempo que se obtenía el primer espectro de una nebulosa, Orión.



Edwin Hubble, con el telescopio de Monte Palomar

Ahora bien, espectros y fotografías necesitan de los telescopios, a los que se acoplan, y si el poder de éstos no hubiese aumentado las nuevas técnicas, poco podrían haber dado de sí. La observación del espacio más allá del Sistema Solar

exigía la penetración en la profundidad de los cielos.

Afortunadamente, fue posible construir telescopios mucho más potentes, aunque hubo que ubicarlos en lugares elevados y alejados de las ciudades, cuyo crecimiento aumentó la contaminación atmosférica y lumínica. La financiación, muy costosa, de los grandes telescopios, exigía cantidades que los presupuestos públicos no podían cubrir. Se necesitaba, por consiguiente, de inversiones privadas, algo para lo que Estados Unidos, la gran nación emergente en industria y economía, estaba particularmente bien dotada.

En el caso de los telescopios refractores se constató que, cuando se aumentaba el tamaño de las lentes, éstas se deformaban por efecto de la gravedad, lo que obligaba a frecuentes revisiones y pulidos; lo anterior llevó a la conclusión de que no era posible con una sola lente concentrar la luz en un punto: 1 m era el máximo aceptable, y el refractor de Yerkes (1897), que tenía esas dimensiones, fue el último de su clase. En cuanto a los reflectores, los que usaban espejos en lugar de lentes, mayor potencia implicaba espejos de mayor tamaño. Los grandes telescopios del siglo XX fueron todos reflectores. En 1907 se instaló en el observatorio de Monte Wilson (California) uno con un espejo de 1,5 m de diámetro y en 1917 otro de 2,4 m, que utilizó Edwin Hubble para realizar las observaciones que cambiaron la imagen del Universo. La primera luz del telescopio Hale de 5 m, en el Monte Palomar (California), se demoró por diferentes motivos, entre otros la Segunda Guerra Mundial, hasta 1948. No tuvo competidores hasta que en 1960-1961 los soviéticos inauguraron uno con un espejo de 6 m y 42 t (toneladas) de peso en el Monte Pastukhov, en el Cáucaso.

Una de las limitaciones de estos telescopios es que captan imágenes sólo en el rango visible del espectro electromagnético, dejando fuera, por tanto, la mayor parte de éste. El primer paso para salvar tal restricción lo dio, sin preverlo de antemano, Karl Jansky, un ingeniero eléctrico que trabajaba para los laboratorios Bell. En 1932, mientras buscaba posibles fuentes de ruido en emisiones de radio, Jansky detectó emisiones electromagnéticas que alcanzaban su mayor intensidad al apuntar a la constelación de Sagitario, en el centro de la galaxia. Comenzaba así la

era de la radioastronomía, dedicada al principio a la identificación de emisiones extraterrestres y muy pronto a las del espacio exterior. La distancia angular entre dos puntos determinaba la calidad de la imagen, pero el aumento exponencial del coste de las antenas aconsejó utilizar la interferencia de las ondas para mejorar la potencia. En vez de aumentar el tamaño del telescopio, se aumentó la distancia entre ellos. El primer interferómetro, una línea de radiotelescopios —discos semiesféricos, cada vez de mayor tamaño— dirigidos al mismo punto del espacio, se inauguró en 1946.

Uno de los primeros lugares en los que floreció institucionalmente la radioastronomía fue Cambridge (Inglaterra), donde Martin Ryle continuó decididamente la senda abierta por Jansky. En semejante tarea se vio ayudado por los conocimientos que había obtenido durante la Segunda Guerra Mundial (trabajó entonces en el Telecommunications Research Establishment gubernamental, más tarde bautizado como Royal Radar Establishment), así como por la mejora que esa conflagración había significado para la instrumentación electrónica. Utilizando radiotelescopios, algunos de cuyos componentes diseñó él mismo, Ryle identificó en 1950 cincuenta radiofuentes, número que aumentó radicalmente cinco años más tarde, cuando llegó a las 2.000.

Una vez que se dispuso de satélites artificiales y de poderosos cohetes, fue posible llevar a cabo un proyecto puramente científico de gran importancia: colocar un telescopio en un satélite, con lo que se evitaba la pantalla que constituye la atmósfera terrestre. El astrónomo estadounidense Lyman fue el primero que comenzó a trabajar seriamente, hacia 1946, en esta idea, que finalmente hizo suya la agencia espacial norteamericana, la NASA, que en 1990 puso en órbita el que se conoce como Telescopio Espacial Hubble, que tardó algo más en funcionar correctamente debido a un error en la fabricación del espejo principal, responsable de un efecto de aberración. Hubo que fabricar uno nuevo e instalarlo en una misión espacial. Continúa en funcionamiento y ha posibilitado un manantial extraordinario de observaciones que apenas tienen rival.

§3. La expansión del Universo

La introducción de las técnicas espectrográficas condujo a un par de resultados de naturaleza fundamental. El primero de ellos tuvo que ver con la cuestión de si nuestra galaxia, la Vía Láctea, agota todo el Universo o si, por el contrario, existen otras estructuras astronómicas (otras galaxias) de naturaleza similar, pero separadas de ella por grandes distancias. Se puede decir que en la culminación de este largo debate (1924) resultó decisiva la utilización de unos magníficos indicadores de distancias, las estrellas cefeidas, denominadas así por su prototipo, Delta Cephei, descubierta en 1786 por John Goodricke. Las cefeidas son unas estrellas de luminosidad variable, que comenzó a estudiar en 1908 Henrietta Leavitt, una ayudante del observatorio de Harvard. Lo que Leavitt descubrió, cuatro años después, es que existía una relación lineal entre el logaritmo del periodo de la variación de la luminosidad de las cefeidas que se observaban en la nube de Magallanes y la propia luminosidad (intrínseca, o absoluta). El mecanismo que se podía seguir entonces era simple:

1. se medía el periodo y de éste se podía deducir, mediante la relación mencionada, la luminosidad intrínseca de la cefeida;
2. como en el observatorio se mide la intensidad relativa, es posible, comparando ambas, intrínseca y relativa, deducir las distancias mediante sencillas reglas trigonométricas.

De esta manera, las magnitudes permitían calcular las distancias; esto es, se podía determinar la distancia a la que se encontraba la cefeida, con lo que se caracterizaba también la distancia de la agrupación estelar (una galaxia, por ejemplo) a la que pertenecía. En 1917, por ejemplo, Harlow Shapley, del observatorio de Monte Wilson (California), descubrió que el Sistema Solar no se encontraba en el centro de la Vía Láctea, sino en uno de sus brazos, y calculó las distancias y dimensiones a partir del pulso de las cefeidas.

Shapley también utilizó este método para determinar las distancias de los cúmulos globulares que rodean a la Vía Láctea, en los que abundan las cefeidas. En 1918

anunció que las distancias que nos separan de esos cúmulos alcanzan los 200.000 años luz, lo que significaba que la Vía Láctea tiene unos 300.000 años luz de diámetro.

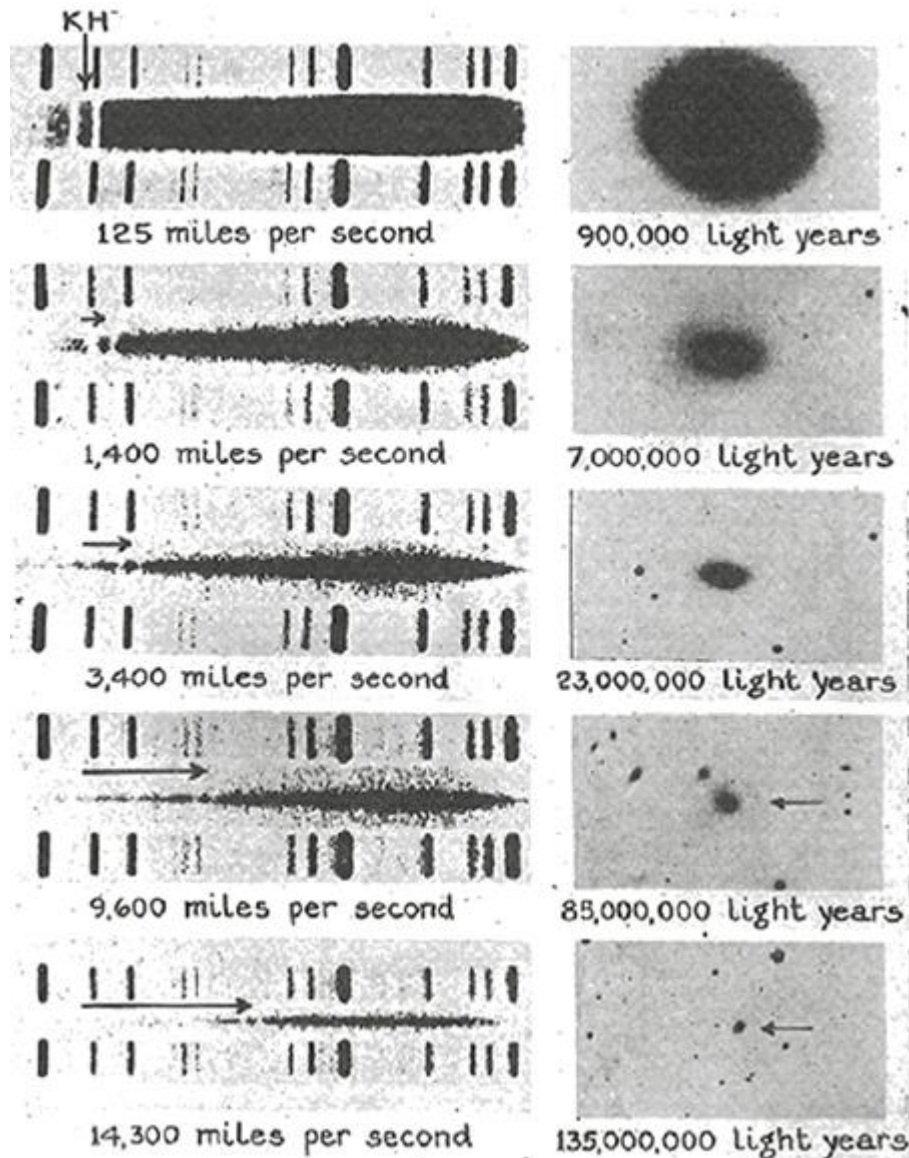


Diagrama de los desplazamientos hacia el rojo que mostraron la expansión del Universo

En consecuencia, nuestra galaxia pasaba a tener un tamaño alrededor de diez veces mayor de lo supuesto hasta entonces. Esto implicaba que aumentaba su capacidad

para acoger en su seno objetos celestes, lo que iba en contra de la idea de que existiesen otros universos-islas (galaxias) fuera de ella. Por decirlo de otra manera: se reforzaba la idea de que las fronteras de nuestra galaxia constituían las distancias mayores existentes en el Universo. Que estaba equivocado es algo que demostró Edwin Hubble (1889-1953), que había iniciado su carrera sin una preparación especializada, aunque pronto evidenció una capacidad excepcional para la observación con el telescopio de 2,5 m del citado observatorio de Monte Wilson, donde empezó a trabajar en 1919.

A partir de 1921 Hubble comenzó a tomar fotografías de la nebulosa irregular NG 6822 con el telescopio de 2,5 m. En 1924 ya tenía más de 50 placas y 11 cefeidas, estableciendo la distancia de la nebulosa en 700.000 años luz, una distancia mucho mayor que la estimación más extremada de los límites de nuestra galaxia. Al mismo tiempo que estudiaba NG 6822, Hubble se ocupaba de galaxias espirales, encontrando —de nuevo con la ayuda de cefeidas— que también ellas se hallaban a distancias superiores a las del tamaño de la Vía Láctea. De esta manera quedaba sentenciado el antiguo debate de la estructura del Universo.

Una vez que hubo determinado la distancia de varias galaxias espirales, Hubble fue capaz de demostrar la existencia de una relación extremadamente importante entre la velocidad con que se mueven esas galaxias y su distancia. Lo que hizo —con la ayuda de Milton Humason, un ayudante de astrónomos con gran habilidad para obtener placas fotográficas— fue lo siguiente: conocía la distancia de 5 galaxias (y una sexta compañera) a partir de cefeidas. Con estas nebulosas calibró la magnitud media de la estrella más brillante en una galaxia, dato que utilizó para determinar la distancia de otras 14 galaxias. Empleó entonces estas 20 para calibrar la magnitud media de una nebulosa, utilizando el resultado para estimar la distancia de otras 4. Con las distancias de 24 de las 46 nebulosas extragalácticas para las que se habían determinado sus velocidades radiales, Hubble y Humason pudieron demostrar (y así lo publicaron en 1931) la existencia de una relación lineal entre distancias y velocidades radiales (que conocía midiendo el desplazamiento — un efecto tipo Doppler— de los espectros de la radiación procedente de esas galaxias). El trabajo

de Hubble tenía una interpretación directa: cuanto más alejadas se encontraban las galaxias, más rápidamente se alejaban (entre sí); se alejaban, puesto que el desplazamiento observado era hacia el extremo rojo del espectro, no hacia el azul. La interpretación más inmediata era que el Universo se encontraba en expansión. Y si el Universo se expandía, esto quería decir que debió de existir en el pasado (estimado inicialmente en unos 10.000 M. a., más tarde en 15.000 y en la actualidad en 13.700) un momento en el que toda la materia habría estado concentrada en una pequeña extensión. Otra cosa era, claro, enmarcar este resultado y sus consecuencias en un modelo cosmológico.

§4. Origen y evolución del Universo

La cosmogonía describe la formación del Universo, mientras que la cosmología explica su origen y evolución. Naturalmente, se trata de una serie de cuestiones que los humanos se plantearon desde antiguo, pero con el recurso de, básicamente, metáforas o mitos, incluso con la teoría de la gravitación de Newton, no fue posible construir una cosmología científica (al fin y al cabo, la gravitación es la fuerza dominante en el Universo). Fue Albert Einstein quien cambió esta situación. En 1916, inmediatamente después de completar la teoría general de la relatividad, Einstein se planteó aplicarla al conjunto del cosmos. Incapaz de imaginar que el Universo no fuese, en media (esto es, ignorando movimientos locales), estático, buscó una solución de las ecuaciones de la relatividad general que pudiese acomodarse a semejante posibilidad. Y pronto se dio cuenta de que era imposible: al ser la interacción gravitacional atractiva, terminarían produciéndose inestabilidades que desharían ese Universo estático. Para compensar ese efecto atractivo introdujo de manera *ad hoc* un nuevo término en las ecuaciones de la relatividad general, el denominado «término cosmológico», que equivalía a un campo de fuerzas repulsivo. Pudo así encontrar el modelo de Universo estático (supuso que su contenido era de densidad uniforme) que buscaba. Con él creó la cosmología, entendida como disciplina auténticamente científica, frente a las apenas analíticas, escasamente predictivas, cosmogonías anteriores. Tal modelo fue

finalmente arrinconado ante la evidencia encontrada por Hubble de que el Universo no es estático, sino que se expande. Afortunadamente para la cosmología relativista, existían soluciones de sus ecuaciones (que no necesitaban de la constante cosmológica) que representaban universos en expansión: espacios en un Universo homogéneo e isótropo (aunque «Universo» y «espacio» son usados a veces como sinónimos, también tienen significados específicos: la expansión se refiere únicamente al espacio, no a los cuerpos que configuran el Universo). Y lo curioso es que aquéllas fueron encontradas antes de los resultados de Hubble. Fueron el producto de trabajos de científicos como el sacerdote y físico belga Georges Lemaître (1894-1966), el matemático y físico ruso Alexander Friedman (1888-1925), el matemático estadounidense Howard Robertson o el matemático inglés Arthur Geoffrey Walker. De todos estos, únicamente Lemaître pensó que tal solución podía tener realidad física. Lo hizo en un artículo titulado «Un Universo homogéneo de masa constante y de radio creciente, que explica la velocidad radial de nebulosas extragalácticas», que publicó en 1927 en la revista *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*. Tomando como base la teoría de la relatividad general y observaciones publicadas por Hubble en 1926, Lemaître obtenía una solución de la construcción einsteiniana en la que, como señalaba en sus conclusiones, «el radio del Universo crece sin cesar desde un valor asintótico R_0 , para $t = -\infty$ », y que, además, le permitía obtener una primera estimación basada en la observación de la constante de Hubble.

A pesar de su carácter pionero, el trabajo de Lemaître pasó casi desapercibido. Tan sólo poco después, cuando en 1931 Hubble publicó sus resultados finales, la expansión del Universo tomó carta de naturaleza. Sin embargo, y a pesar de lo que podamos pensar en la actualidad, en un momento en que la expansión del Universo forma parte de la cultura universal, esto no fue siempre así, como prueba la cosmología del estado estable, propuesta en 1948 por tres físicos y cosmólogos instalados en Cambridge: Fred Hoyle, por un lado, y Hermann Bondi y Thomas Gold, por otro (los tres habían discutido sus ideas con anterioridad a la publicación de sus respectivos artículos). Esta cosmología, que sostenía (principio cosmológico

perfecto) que el Universo siempre ha tenido y tendrá la misma forma (incluyendo densidad de materia, lo que, debido a la evidencia de la expansión del Universo, obligaba a introducir la creación de materia, para que un «volumen» de Universo tuviese siempre el mismo contenido, a pesar de estar dilatándose), que no tuvo ni un principio ni tendrá un final, ejerció una gran influencia durante la década de los años cincuenta, siendo finalmente socavada con la llegada de la radioastronomía (en la que destacaron inicialmente las medidas realizadas con los telescopios del Cambridge inglés, dirigidas por Martín Ryle) y, definitivamente, con el descubrimiento del fondo de radiación de microondas.

El descubrimiento de este fondo se llevó a cabo gracias a la disponibilidad de una antena de comunicaciones de los laboratorios Bell estadounidenses destinada en principio a la comunicación, vía el globo Echo, con el satélite Telstar de la compañía (la antena tenía que ser muy precisa, ya que, debido a la forma del globo, las señales que incidían en él se difundían mucho). Realizando medidas para una longitud de onda de radiación de 7,4 cm, Arno Penzias y Robert Wilson encontraron en 1963 un «ruido de fondo» que correspondía a una radiación de temperatura de 2,75 °K, cuando suponían que debía ser menor, aproximadamente 3,3. Además, esta temperatura-radiación suplementaria resultó ser independiente de la dirección en la que se orientase la antena. Los datos obtenidos indicaban que lo que estaban midiendo no tenía origen atmosférico, ni solar ni galáctico. La solución a la pregunta de qué era llegó de la cercana Universidad de Princeton, donde James Peebles ya había considerado la idea de que, si hubo un *Big Bang*, tendría que existir un fondo de ruido remanente del Universo primitivo, un ruido que, en forma de radiación, correspondería a una temperatura mucho más fría (a causa del enfriamiento asociado a la expansión del Universo) que la enorme temperatura que debió de producirse en aquella gran explosión. Las ideas de Peebles habían animado a su colega en Princeton Robert Dicke a iniciar un experimento destinado a encontrar esa radiación de fondo cósmico, tarea en la que se les adelantaron, sin pretenderlo, Penzias y Wilson. Aun así, fue el grupo de Princeton el que suministró la interpretación de las observaciones de Penzias y Wilson, que éstos publicaron sin

hacer ninguna mención a sus posibles implicaciones cosmológicas.

El descubrimiento de Penzias y Wilson apoyó la idea de que el Universo se expande, pero, una vez entrados en este terreno, hay otras cuestiones que considerar. Con los datos de que se disponía, durante un tiempo bastó con el modelo de la relatividad general que suministraba las soluciones que representan el Universo expandiéndose con una aceleración que depende de su contenido de masa-energía. Pero terminaron surgiendo problemas para la cosmología del *Big Bang*. Uno de ellos era si esa masa-energía es tal que el Universo continuará expandiéndose siempre, o si es lo suficientemente grande como para que la atracción gravitacional termine venciendo a la fuerza del estallido inicial, haciendo que, a partir de un momento, comience a contraerse para finalmente llegar a un *Big Crunch* (gran contracción). Otro problema residía en la gran uniformidad que se observa en la distribución de masa del Universo, si se toman como unidad de medida escalas de unos 300 millones de años luz o superiores (a pequeña escala, por supuesto, el Universo, con sus estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias y enormes vacíos interestelares, no es homogéneo). El fondo de radiación de microondas es buena prueba de esa macrohomogeneidad. Ahora bien, en la teoría estándar del *Big Bang* es difícil explicar dicha homogeneidad mediante los fenómenos físicos conocidos; además, si se tiene en cuenta que la información sobre lo que sucede entre diferentes puntos del espacio-tiempo no puede ser transmitida con una velocidad superior a la de la luz, sucede que en los primeros momentos de existencia del Universo no habría sido posible que regiones distintas llegasen a un consenso, por decirlo de alguna manera, acerca de cuál debería ser la densidad media de materia y radiación.

Para resolver este problema se propuso la idea del Universo inflacionario, según la cual en los primeros instantes de vida del Universo se produjo un aumento gigantesco, exponencial, en la velocidad de su expansión. En otras palabras, el mini-Universo habría experimentado un crecimiento tan rápido que no habría habido tiempo para que se desarrollasen procesos físicos que habrían dado lugar a distribuciones inhomogéneas. Una vez terminada la etapa inflacionaria, el Universo

habría continuado evolucionando de acuerdo con el modelo clásico del *Big Bang*.

En cuanto a quiénes fueron los científicos responsables de la teoría inflacionaria, los principales nombres que hay que citar son los del estadounidense Alan Guth y el soviético Andrei Linde. Pero, más que nombres concretos, lo que nos interesa resaltar es que no es posible comprender esta teoría al margen de la física de altas energías (antes denominada de partículas elementales), en concreto de las recientemente mencionadas teorías de gran unificación (*Grand Unified Theories*; GUT), que predicen que tendría que producirse una transición súbita, una transición de fase, a temperaturas del orden de 10^{27} °K (en una transición de fase tiene lugar un cambio repentino en el estado del sistema en cuestión; un ejemplo es cuando el agua —un líquido— se convierte en hielo, que es sólido).

Bien, la inflación da origen a un Universo uniforme, pero entonces ¿cómo surgieron las minúsculas inhomogeneidades primordiales de las que habrían nacido, al pasar el tiempo y actuar la fuerza gravitacional, estructuras cósmicas como las galaxias?

Una posible respuesta a esta pregunta es que la inflación podría haber amplificado enormemente las ultramicroscópicas fluctuaciones cuánticas que se producen debido al principio de incertidumbre cuántico aplicado a energías y tiempo (el producto de la incertidumbre en la determinación del valor de la energía por la incertidumbre en la determinación del valor del tiempo es mayor o igual que la constante de Planck). Si es así, ¿dónde buscar tales inhomogeneidades mejor que en el fondo de radiación de microondas?

El proceso de esta búsqueda constituyó el trabajo de un equipo de científicos estadounidenses, a cuya cabeza estaban John C. Mather y George Smoot. Cuando la NASA aprobó en 1982 fondos para la construcción de un satélite para estudiar el fondo cósmico de microondas —el Cosmic Background Explorer (COBE), que fue puesto en órbita, a 900 km de altura, en el otoño de 1989—, Mather se encargó de coordinar todo el proceso, así como del experimento (en el que utilizó un espectrofotómetro enfriado a 1,5 °K) que demostró que la forma del fondo de radiación de microondas se ajustaba a la de una radiación de cuerpo negro a la

temperatura de 2, 735 °K, mientras que Smoot midió las minúsculas irregularidades predichas por la teoría de la inflación. Diez años después se anunciaba que el COBE había detectado lo que Smoot denominó «arrugas» del espacio-tiempo, las semillas de las que surgieron las complejas estructuras —como las galaxias— que ahora vemos en el Universo.

§5. Cosmodiversidad

El desarrollo tecnológico, indispensable para avanzar en el conocimiento de las estructuras que existen en el Universo, condujo a partir de la década de 1960 al descubrimiento de nuevos objetos astronómicos. En 1963, un radioastrónomo inglés que trabajaba en Australia, Cyril Hazard, estableció con precisión la posición de una poderosa radiofuente, denominada 3C273. Con estos datos, el astrónomo holandés Maarten Schmidt, del observatorio de Monte Palomar (California), localizó ópticamente el correspondiente emisor, encontrando que las líneas del espectro de 3C273 estaban desplazadas hacia el extremo del rojo en una magnitud que revelaba su alejamiento de la Tierra a una velocidad enorme: 16 % de la velocidad de la luz. Utilizando la ley de Hubble, que afirma que la distancia de las galaxias entre sí es directamente proporcional a su velocidad de recesión, se deducía que 3C273 estaba muy alejada, lo que a su vez implicaba que se trataba de un objeto extremadamente luminoso, 100 veces más que una galaxia típica. Este objeto fue bautizado como *quasi-stellar source* («fuente casi estelar»), esto es, *quasar* (cuásar), aceptándose en la actualidad que se trata de una galaxia con núcleo muy activo, probablemente impulsado por materia que está siendo absorbida por un agujero negro con una masa centenares de veces la del Sol.

En 1967, la astrofísica Jocelyn Bell, Anthony Hewish y los colaboradores de éste en Cambridge construyeron un detector para observar cuásares en las frecuencias radio. Mientras lo utilizaba, Bell observó una señal que aparecía y desaparecía con gran rapidez y regularidad. Tan constante era el periodo, que parecía tener un origen artificial (¿acaso una fuente extraterrestre inteligente?). Tras una cuidadosa búsqueda, Bell y Hewish concluyeron que estos púlsares, como finalmente fueron

denominados, tenían un origen astronómico. Ahora bien, ¿qué eran esas radiofuentes tan regulares? La interpretación teórica llegó en 1968, de la mano de Thomas Gold, quien se dio cuenta de que los periodos tan pequeños implicados (del orden de 1 o 3 segundos en los primeros púlsares detectados) exigían una fuente de tamaño muy pequeño. Afortunadamente, en 1934, por tanto sólo dos años después de que James Chadwick descubriese el neutrón, el físico y astrofísico suizo afincando en California (Caltech) Fritz Zwicky sugirió la posibilidad de que existieran estrellas de neutrones, especie de núcleos gigantes formados únicamente por neutrones y unidos por la fuerza de la gravedad. La masa mínima para que pueda existir una estrella de neutrones es, según la relatividad general, 0,1 masas solares, mientras que el máximo parece encontrarse en torno a 6 masas solares. En el caso de una estrella de neutrones de 1 masa solar, su radio sería de unos 13 km y su densidad de $2 \times 10^{17} \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$, alrededor de 2×10^{14} veces la densidad del agua. Recordando esto, Gold propuso que los púlsares son en realidad estrellas de neutrones en rotación.



LIGO (Laser Interferometric Gravitational Wave Observatories), observatorio para detectar ondas gravitacionales

Además de su interés astrofísico, los púlsares tienen también otras funciones. Por ejemplo, pueden utilizarse para comprobar la predicción de la relatividad general de que masas aceleradas emiten radiación gravitacional (un fenómeno análogo al que se produce con las cargas eléctricas aceleradas: la radiación electromagnética). La confirmación de que, efectivamente, la radiación gravitacional existe derivó del descubrimiento, en 1974, del primer sistema formado por dos púlsares interaccionando entre sí (denominado PSR1913+16), descubrimiento por el que Russell Hulse y Joseph Taylor recibieron en 1993 el Premio Nobel de Física. En 1978, después de varios años de observaciones continuadas de ese sistema binario, pudo concluirse que las órbitas de los púlsares varían, acercándose entre sí, un resultado que se interpreta en términos de que el sistema pierde energía debido a la emisión de ondas gravitacionales. Desde entonces han sido descubiertos otros púlsares en sistemas binarios, pero lo que aún resta es detectar la radiación gravitacional identificando su paso por instrumentos construidos e instalados en la Tierra, una empresa extremadamente difícil, dado lo minúsculo de los efectos implicados: se espera que las ondas gravitacionales que lleguen a la Tierra (originadas en algún rincón del Universo en el que tenga lugar un suceso extremadamente violento) produzcan distorsiones en los detectores de no más de una parte en 10^{21} ; esto es, una pequeña fracción del tamaño de un átomo. La confirmación llegó a comienzos de 2016, en el sistema estadounidense denominado LIGO, por sus siglas inglesas, Laser Interferometric Gravitational Wave Observatories (Observatorio de Interferometría Láser de Ondas de Gravedad), compuesto de dos observatorios separados por 3.000 km (esta duplicidad permite identificar señales falsas, producidas por efectos locales), uno en Livingston (Luisiana) y el otro en Hanford (Washington). La idea en ellos es utilizar sistemas interferométricos de dos brazos perpendiculares y en condiciones de vacío con un recorrido óptico de 2 o 4 km, para detectar las ondas gravitacionales a través de los minúsculos movimientos que deben producir en los espejos. Las ondas gravitacionales detectadas corresponden al choque de dos agujeros negros, lo que de paso significa una nueva confirmación de la existencia de estos singulares

objetos cósmicos, de los que trataremos más adelante.

También los cuásares resultan ser objetos muy útiles para estudiar el Universo en conjunción con la relatividad general. Alrededor de uno entre quinientos cuásares se ve implicado en un fenómeno relativista muy interesante: la desviación de la luz que emiten debido al efecto gravitacional de otras galaxias situadas entre el cuásar en cuestión y la Tierra, desde donde se observa este fenómeno, denominado «lentes gravitacionales», que Einstein había predicho en 1936. El efecto de curvatura puede llegar a ser tan grande que en ocasiones se observan imágenes múltiples de uno solo de estos cuásares tan lejanos.

En realidad, el fenómeno de las lentes gravitacionales no es producido únicamente por cuásares; también las grandes acumulaciones de masas (como cúmulos de galaxias) pueden desviar la luz procedente de, por ejemplo, galaxias situadas detrás de ellas (con respecto a nosotros), dando lugar no a una imagen más o menos puntual, sino a un halo de luz, a una imagen desdoblada. Este tipo de efecto fue observado por primera vez en 1979, cuando Dennis Walsh, Robert Carswell y Ray Weymandescubrieron una imagen múltiple de un cuásar en 0957+561. Posteriormente, se han tomado fotografías con el Telescopio Espacial Hubble de un cúmulo de galaxias, situado a unos 1.000 millones de años luz de distancia, en el que, además de las galaxias que lo forman, se observan numerosos arcos que se detectan con mayor dificultad debido a su más débil luminosidad. Estos arcos son en realidad las imágenes de galaxias mucho más alejadas de nosotros que las que constituyen el propio cúmulo, pero que observamos mediante el efecto de lente gravitacional (el cúmulo desempeña el papel de la lente que distorsiona la luz procedente de esas galaxias muy alejadas). Además de proporcionar nuevas evidencias en favor de la relatividad general, estas observaciones tienen el valor añadido de evidenciar que la magnitud de la desviación y distorsión que se manifiesta en estos arcos luminosos es mucho mayor de lo que se esperaría si en el cúmulo no hubiese nada más que las galaxias que vemos en él, lo que significa que ha de existir más masa de la observada.

Ya en 1933, Fritz Zwicky sugirió que debía de existir una «masa invisible» para

explicar la fuerza gravitacional que mantiene unidas agrupaciones de galaxias. Investigaciones de este tipo resurgieron gracias sobre todo a los trabajos realizados a finales de 1960 por Vera Rubin y Kent Ford. Al estudiar el gas y polvo existente en la galaxia Andrómeda, la más cercana a la Vía Láctea, encontraron, contrariamente a lo que se deduce aplicando la mecánica newtoniana, que el gas, polvo y estrellas situados en los bordes exteriores rotaban con la misma velocidad que los que se encontraban en el centro. Una posible explicación era que Andrómeda estuviera rodeada de una especie de halo de masa invisible. En 1970, Rubin y Ford publicaron un artículo («Rotación en la nebulosa Andrómeda medida en un estudio espectrográfico de regiones de emisión») en la revista *Astrophysical Journal*. A partir de entonces fueron muchos los que obtuvieron resultados similares, que reforzaron la idea de la existencia de una masa no identificada. Las evidencias apuntan a que los cúmulos que acabamos de mencionar contienen entre cinco y diez veces más materia de la que se observa. Es opinión generalizada que existe en el cosmos una gran cantidad de materia que no observamos, pero que ejerce fuerza gravitacional. Se cree que esta materia «oscura» constituye en torno al 27 % de toda la materia del Universo.

Junto al problema de la materia oscura, otro parecido adquirió prominencia en la última década del siglo XX: el de la energía oscura. Estudiando un tipo de supernovas —estrellas que han explotado dejando un núcleo—, un grupo dirigido por Saul Perlmutter (del laboratorio Lawrence en Berkeley, California) y otro encabezado por Brian Schmidt (observatorios de Monte Stromlo y Siding Spring, en Australia) llegaron a la conclusión de que, al contrario de lo supuesto hasta entonces, la expansión del Universo se está acelerando. Y aquí surge el problema, ya que la masa del Universo no puede explicar tal aceleración; había que suponer que la gravedad actúa de una nueva y sorprendente manera: alejando las masas entre sí, no atrayéndolas. Se había supuesto que para propulsar el *Big Bang* tendría que haber existido una energía repulsiva en la creación del Universo, pero no se había pensado que pudiera existir en el Universo ya maduro.

Una nueva energía entraba así en acción, una energía «oscura» que reside en el

espacio vacío. Y como explicó Einstein en 1905 con su célebre ecuación $E = m \times c^2$ (energía igual al producto de la masa por la velocidad de la luz al cuadrado), la energía es equivalente a la masa, por lo que esta energía oscura significa una nueva aportación a la masa total del Universo, distinta, eso sí, de la masa oscura. Se tiene, así, que alrededor del 3 % del Universo está formado de masa ordinaria, el 30 % de masa oscura y el 67 % de energía oscura. En otras palabras: creíamos que conocíamos eso que llamamos Universo y resulta que es un gran desconocido. Porque, aunque existen algunas propuestas, la verdad es que por el momento no se sabe realmente qué son ni la materia oscura ni la energía oscura.

Y están también los agujeros negros. El origen de los estudios contemporáneos que condujeron a los agujeros negros se remonta a la década de 1930, cuando el físico de origen hindú Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) y el ruso Lev Landau (1908-1968) demostraron que en la teoría de la gravitación newtoniana un cuerpo frío de masa superior a 1,5 veces la del Sol no podría soportar la presión producida por la gravedad. Este resultado condujo a la pregunta de qué sucedería según la relatividad general. Robert Oppenheimer (1904-1967), junto a dos de sus colaboradores, George M. Volkoff y Hartland Snyder, demostró en 1939 que una estrella de semejante masa se colapsaría hasta reducirse a una singularidad, esto es, a un punto de volumen cero y densidad infinita.

Pocos prestaron atención a las conclusiones de Oppenheimer y sus colaboradores o creyeron en ellas, de modo que su trabajo fue ignorado. Durante algunos años predominaron los estudios puramente matemáticos, dominio liderado por Roger Penrose y Stephen Hawking. La idea física subyacente era que debían de representar objetos muy diferentes a cualquier otro tipo de estrella, aunque su origen estuviese ligado a éstas. Surgirían cuando, después de agotar su combustible nuclear, una estrella muy masiva comenzase a contraerse irreversiblemente debido a la fuerza gravitacional. Así, llegaría un momento en el que se formaría una región (denominada «horizonte») que únicamente dejaría entrar materia y radiación, sin permitir que saliese nada, ni siquiera luz (de ahí lo de «negro»): cuanto más grande es, más come, y cuanto más come, más crece. En el centro del agujero negro está el

punto de colapso. De acuerdo con la relatividad general, allí la materia que una vez compuso la estrella es comprimida y expulsada aparentemente fuera de la existencia.

Evidentemente, «fuera de la existencia» no es una idea aceptable. Ahora bien, existe una vía de escape a semejante paradójica solución: la teoría de la relatividad general no es compatible con los requisitos cuánticos, pero cuando la materia se comprime en una zona muy reducida son los efectos cuánticos los que dominarán. Por consiguiente, para comprender realmente la física de los agujeros negros es necesario disponer de una teoría cuántica de la gravitación (cuantizar la relatividad general o construir una nueva teoría de la interacción gravitacional que sí se pueda cuantizar), una tarea aún pendiente en la actualidad, aunque se hayan dado algunos pasos en esta dirección, uno de ellos debido al propio Hawking, el gran gurú de los agujeros negros: la denominada «radiación de Hawking», la predicción de que, debido a procesos de índole cuántica, los agujeros negros no son tan negros como se pensaba, pudiendo emitir radiación.

No sabemos, por consiguiente, muy bien qué son estos misteriosos y atractivos objetos. De hecho, ¿existen realmente? La respuesta es sí, y cada vez aparecen más evidencias en favor de ello. La primera fue consecuencia de la puesta en órbita, el 12 de diciembre de 1970, desde Kenia, para conmemorar la independencia del país, de un satélite estadounidense bautizado como Uhuru, la palabra suajili para «libertad». Con este instrumento se pudo determinar la posición de las fuentes de rayos X más poderosas. Entre las 339 fuentes identificadas, figura Cygnus X-1, una de las más brillantes de la Vía Láctea, en la región del Cisne. Esta fuente se asoció posteriormente a una estrella supergigante azul, visible, de una masa 30 veces la del Sol, y una compañera invisible cuya masa se estimó —analizando el movimiento de la primera— en 7 masas solares, una magnitud demasiado grande para ser una estrella de neutrones, por lo que se considera un agujero negro. No obstante, algunos sostienen que la masa de este objeto invisible es de 3 masas solares, con lo que podría ser una estrella de neutrones; en cualquier caso, ya se han encontrado otros sistemas binarios (al menos 10), uno de cuyos miembros parece ser un

agujero negro: por ejemplo, V404 Cygni, constituido por una estrella de $2/3$ la masa del Sol y un agujero negro de 12 masas solares. En la actualidad se acepta generalmente que existen agujeros negros supermasivos en el centro de aquellas galaxias (aproximadamente el 1 % del total de las del Universo) cuyo núcleo es más luminoso que el resto de toda la galaxia. De manera indirecta se han determinado las masas de esos superagujeros negros en más de doscientos casos, pero sólo en unos pocos de manera directa; uno de ellos está en la propia Vía Láctea. Tal vez, si Ícaro hubiese podido continuar elevándose, alejándose cada vez más de la Tierra, abandonando finalmente el Sistema Solar para explorar el centro de la Vía Láctea, hubiese terminado siendo absorbido, devorado, por ese monstruo negro central que alberga nuestra galaxia. No estaría mal desarrollar esta nueva mitología.

Hasta el momento, ocupándonos del Universo tomado en su conjunto, viendo qué se sabe de su estructura, de su dinámica, encontrándonos con objetos nunca antes siquiera soñados por los astrónomos del pasado, como pueden ser los púlsares y los cuásares o los agujeros negros, buscando la novedad, lo extraño, puede parecer que nos hayamos olvidado de los cuerpos astronómicos con los que más familiarizados estamos: los planetas. Pero no es así.

Gracias al avance tecnológico, los científicos están siendo capaces de comprobar lo que parecía evidente: que existen sistemas planetarios asociados a estrellas que no son el Sol. El primer hallazgo en este sentido se produjo en 1991, cuando Alex Wolszczan, un astrónomo polaco instalado en Estados Unidos (en la Universidad Estatal de Pensilvania), y el canadiense del Observatorio Radioastronómico Nacional de Socorro (Nuevo México) Dale Frail descubrieron que dos planetas con masas 4, 3 y 1, 8 veces la de la Tierra orbitan alrededor del púlsar PSR1257+12; cuatro años después, dos astrónomos suizos de la Universidad de Ginebra, Michel Mayor y Didier Queloz, hicieron público que habían descubierto un planeta del tamaño y tipo de Júpiter (un gigante gaseoso) orbitando en torno a una estrella del tipo del Sol, 51 Pegasi. Desde entonces el número de planetas extrasolares conocidos ha aumentado considerablemente.

§6. Nucleosíntesis estelar

Aceptado el modelo del *Big Bang*, se sigue inmediatamente que el Universo tuvo necesariamente que pasar por una fase dominada por energías de magnitud extraordinarias y por dimensiones ultramicroscópicas, una fase que fue decisiva para su historia posterior. Ahora bien, dimensiones y energías de esa magnitud pertenecen al dominio de la física cuántica, en general, y al de la física de partículas elementales y altas energías, en particular. Fue necesario, por consiguiente, recurrir a estas ramas de la física para estudiar la historia temprana del Universo, y también algunos procesos que tienen lugar en él, como los que se producen en el interior de las estrellas.

La reunión de astrofísica y cosmología con la física cuántica de altas energías es un proceso que se inició sobre todo a comienzos de la década de 1970, con trabajos de físicos teóricos de altas energías, aunque antes, durante la primera mitad del siglo XX, algunos físicos nucleares, entre los que es obligado mencionar a Carl Friedrich von Weizsacker en Alemania y a Hans Bethe en Estados Unidos, se ocuparon del problema de la formación de los elementos, más allá del hidrógeno y el helio.

Producto de un gran número de trabajos, sabemos que la historia del Universo comenzó con una fase inicial (con temperaturas del orden de 100.000 millones de grados kelvin) en la que estaba formado por una «sopa» indiferenciada, una mezcla de radiación electromagnética (constituida por fotones, las partículas de la luz según la física cuántica) y de algunas partículas elementales, electrones y neutrinos y sus respectivas antipartículas —positrones y antineutrinos—, además de un número mucho más pequeño de protones y neutrones, mucho más pesados que las partículas anteriores.

Al ir disminuyendo la temperatura del Universo (que experimentó en sus primeros instantes una expansión muy acelerada, una inflación, a la que ya nos hemos referido), esa sopa se fue diferenciando. A la temperatura de 30.000 millones de grados kelvin, alcanzada en unos 0, 11 segundos, los fotones —esto es, la radiación— se independizaron de la materia, distribuyéndose de manera uniforme

por el espacio. Únicamente cuando la temperatura del Universo descendió a los 3.000 millones de grados kelvin (a los 13, 82 segundos del estallido inicial) comenzaron a formarse —mediante la unión de protones y neutrones— algunos núcleos estables, básicamente el hidrógeno (un protón en torno al cual órbita un electrón) y el helio (dos protones y dos neutrones en el núcleo, con dos electrones como satélites). Estos dos elementos, los dos más ligeros que existen en la naturaleza, fueron —junto a fotones y neutrinos— los principales productos del *Big Bang*. Debieron de formarse entre cien segundos y un cuarto de hora después de aquel colosal estallido, y representan aproximadamente el 73 % (el hidrógeno) y el 25 % (el helio) de la materia observable del Universo. Ciertamente, de lo que no hay duda es que este proceso de nucleosíntesis primordial culminó 700.000 años después, cuando la temperatura llegó al punto en el que los núcleos pudieron captar y retener electrones formando átomos estables.

Pero, si se produjo tanto helio en los comienzos del Universo, ¿cómo es que ahora hay tan poco en la Tierra (hidrógeno, por supuesto, hay mucho)? La respuesta es que, aunque el helio constituye la cuarta parte de la masa de la mayoría de las estrellas, su presencia en nuestro planeta es muy rara debido a que es muy ligero y químicamente inactivo (es uno de los denominados gases nobles), por lo que no es atrapado por el campo magnético de la Tierra: así, es fácil para las moléculas de helio que existen en la atmósfera terrestre adquirir, mediante colisiones con otras moléculas, velocidades suficientes como para sustraerse al efecto de la gravedad escapándose al espacio.

De manera que el *Big Bang* nos surtió generosamente de hidrógeno y de helio. Fenomenal, pero ¿y los restantes elementos? Porque sabemos que existen muchos más en la naturaleza. No hace falta ser un experto para saber que hay oxígeno, hierro, nitrógeno, carbono, plomo, sodio, cinc, oro y un montón de elementos más. ¿Cómo se formaron? La pregunta es magnífica, y para contestarla es necesario recurrir a la ciencia que trata de los elementos y de los compuestos que se pueden formar con ellos: la química.

Tras haberse formado el hidrógeno y el helio, y al continuar enfriándose el

Universo, los restantes elementos se originaron mediante reacciones nucleares en un proceso denominado «nucleosíntesis estelar», el mismo que luego tendría lugar en el interior de estrellas.

El hidrógeno y helio primordiales producidos se distribuyeron en polvo interestelar que luego pudo formar nubes que finalmente, mediante la condensación producida por la fuerza gravitacional, originaron protoestrellas de hidrógeno y helio, a las que podemos considerar la primera generación de estrellas (al igual que los seres vivos, las estrellas también cambian a lo largo de su vida: nacen y mueren, siendo sustituidas por otras que pueden ser diferentes). La presión provocada por la acumulación gravitacional de masa tiene como consecuencia el aumento de temperatura en las capas interiores de las protoestrellas y estrellas, aumento que produce reacciones nucleares. Gracias a las investigaciones de físicos nucleares y astrofísicos sabemos que en una de estas reacciones dos núcleos de helio se unen formando un átomo de berilio, elemento que ocupa el cuarto lugar (número atómico) en la tabla periódica, tras el hidrógeno, el helio y el litio (en realidad se produce más de un tipo de berilio; se forman dos isótopos del mismo que sólo difieren en el número de neutrones que existen en el núcleo del átomo). El isótopo del berilio, de masa atómica 8, es muy radiactivo, existiendo durante apenas una diezmilbillonésima de segundo, tras lo cual se desintegra produciendo de nuevo dos núcleos de helio. Pero, si durante ese instante de vida choca con un tercer núcleo de helio, puede formar un núcleo de carbono (número atómico 6 y masa atómica 12), que es estable. Si las temperaturas son suficientemente elevadas, los núcleos de carbono se combinan y desintegran de maneras muy diversas, dando lugar a elementos como magnesio, sodio, neón y oxígeno. A su vez, los núcleos de oxígeno pueden unirse y constituir azufre y fósforo. De este modo, se forman elementos cada vez más pesados. Hasta llegar al hierro. Una vez «cocinado» el hierro, la cadena de reacciones nucleares se detiene. La razón es que los procesos de fusión nuclear asociados a los elementos más ligeros que él liberan energía, pero la energía que se necesita para fusionar los que son más pesados que el hierro es superior a la liberada en el proceso de fusión; es decir, el proceso requiere aporte de

energía y no es energéticamente productivo.

Este hecho nos lleva a otra cuestión, ligada a su vez con una que todavía no hemos abordado: la de cómo han llegado estos elementos a la Tierra. Y si suponemos que no deben de existir diferencias absolutas entre planetas, salvo en detalles como la abundancia de elementos, la temperatura, la posibilidad de que exista vida, ¿cómo han llegado a cualquier otro planeta? La emisión al espacio exterior de elementos nucleares producidos en el interior de estrellas puede tener lugar de tres maneras: mediante la lenta pérdida de masa en estrellas viejas, en la denominada fase «gigante» de la evolución estelar; durante los relativamente frecuentes estallidos estelares que los astrónomos denominan «novas»; y en las dramáticas y espectaculares explosiones que se producen en esa etapa estelar final que alumbran las denominadas «supernovas». (Tycho Brahe, recordemos, observó una en 1572, y desde entonces son muchas las observadas, especialmente en las últimas décadas, gracias a la disponibilidad de poderosos telescopios. En 1987, por ejemplo, se detectó la explosión de la supernova SN1987A, aunque realmente la explosión había tenido lugar 170.000 años antes, que es el tiempo que ha tardado la luz en llegar a la Tierra).

Es sobre todo en la explosión de las supernovas cuando los elementos pesados fabricados en la nucleosíntesis estelar se difunden por el espacio. No se conoce demasiado bien por qué se producen estas explosiones, pero se cree que, además de expulsar los elementos que acumulaba la estrella en su interior —salvo parte que retiene convertidos en objetos muy peculiares, como estrellas de neutrones—, en el estallido se sintetizan elementos todavía más pesados que el hierro; elementos como cobre, cinc, rubidio, plata, osmio, uranio, y así hasta una parte importante de los más de cien elementos que contiene en la actualidad la tabla periódica y que son relativamente abundantes en sistemas planetarios como el nuestro, el Sistema Solar. Precisamente por esta abundancia de elementos pesados parece razonable pensar que el Sol es una estrella de segunda generación, formada hace algo menos de 5.000 M. a., por la condensación de residuos de una estrella anterior que murió en una explosión de supernova. El material procedente de semejante explosión se

agrupó en un disco de gas y polvo con una protoestrella en el centro. El Sol se «encendió» cuando el núcleo central de materia se comprimió tanto que los átomos de hidrógeno se fundieron entre sí. Y a su alrededor, a lo largo de bandas elípticas, siguiendo un proceso parecido, pero menos intenso gravitacionalmente, se formaron los planetas de lo que llamamos Sistema Solar: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte..., y los satélites de éstos, como la Luna.

Desde esta perspectiva, la Tierra (formada hace unos 4.500 M. a.), al igual que otros planetas, es algo parecido a un pequeño basurero cósmico, un lugar en el que se han acumulado restos de la vida de estrellas no lo suficientemente importantes como para dar lugar a una estrella; esto es, en cantidades tan pequeñas que no han podido desencadenar en su interior reacciones termonucleares como las que se producen en las estrellas. Pero al igual que en los basureros también se abre camino la vida, así ocurrió en esta Tierra nuestra, con su diámetro de, aproximadamente, 12.700 km y su peso de unas 6×10^{21} toneladas. Los humanos somos testigos y demostración de este fenómeno.

Capítulo 17

Un planeta que respira: el hábitat de la vida

Contenido:

§1. *El Sistema Solar*

§2. *La Tierra*

§3. *Fotosíntesis y efecto invernadero*

§4. *Oxígeno en la atmósfera terrestre y formas primitivas de vida*

§5. *Atmósferas planetarias*

§6. *La Tierra, hábitat de la vida*

En el capítulo anterior hemos estudiado el conjunto del Universo, pero, siguiendo el esquema lógico que nos hemos planteado, ahora es el momento de pasar a nuestro entorno, al Sistema Solar, primero, y a continuación a uno de sus planetas, la Tierra, en el que ha aparecido y florecido la vida de la que formamos parte los humanos.

§1. El Sistema Solar

El concepto de Sistema Solar como el conjunto de cuerpos celestes atraídos directamente por el Sol, o —como, por ejemplo, en el caso de la Luna— por mediación de los planetas que giran en torno a él, surgió de manera paralela a la invención del telescopio, que permitió diferenciarlo de otras entidades celestes, como estrellas fijas o nebulosas. Vimos en el capítulo anterior que en 1775 Kant publicó un libro, *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*, en el que explicaba la formación del Sistema Solar a partir de una inmensa nube de gas, por la condensación de la materia bajo la acción de la gravedad. Pero las ideas de Kant carecían del soporte técnico que solo la mecánica newtoniana y la matemática podían suministrar. A semejante tarea se dedicó Pierre-Simon Laplace (1749-1827), especialmente en un extenso tratado en cinco volúmenes, *Mécanique céleste* (1799-1825). De carácter más general que la *Mécanique céleste* es otra de sus

obras, *Exposition du systéme du monde*, publicada inicialmente en dos volúmenes en 1796. En la sexta edición de esta obra, aparecida póstumamente (1835), se puede leer:

Entre ese infinito número de puntos rutilantes que salpican la bóveda celeste y mantienen entre sí una posición aproximadamente constante, hay diez astros permanentemente visibles, en tanto no se suman en los rayos del Sol, que se mueven según leyes harto complicadas cuya búsqueda es uno de los principales objetos de la Astronomía. Esos astros a que se ha dado el nombre de planetas son Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, conocidos desde la antigüedad porque se los puede percibir a simple vista; a ellos hay que añadir Urano, Ceres, Palas, Juno y Vesta, cuyo reciente descubrimiento se debe al descubrimiento del telescopio.

Vimos que Urano lo había descubierto William Herschel en 1781. Ceres (identificado el 1 de enero de 1801 por Giuseppe Piazzi), Palas (28 de marzo de 1802, Heinrich Olbers), Juno (1 de septiembre de 1804, Karl Harding) y Vesta (29 de marzo de 1807, Heinrich Olbers) son planetas enanos situados en el cinturón de asteroides que se halla entre las órbitas de Marte y Júpiter. Explicamos en el capítulo anterior que en 1846 se descubrió otro planeta, el octavo del Sistema Solar, al que se dio el nombre de Neptuno. Plutón, descubierto en 1930, que se solía incluir en la lista de planetas del Sistema Solar, fue excluido en 2006, cuando la Unión Astronómica Internacional estableció que para que un cuerpo celeste sea calificado como planeta se deben cumplir las siguientes condiciones: 1) orbitar alrededor del Sol; 2) poseer suficiente masa como para que su propia gravedad domine las fuerzas presentes como cuerpo rígido, lo que implica una forma aproximadamente redondeada; 3) ser el objeto claramente dominante en su vecindad, habiendo limpiado su órbita de cuerpos similares a él. Según esta definición, Plutón, cuyo diámetro es de 2.344 km, esto es, el 0, 18 del de la Tierra, y su masa el 0, 002 de la terrestre, no es un planeta, y ha de incluirse en la categoría de planeta enano.

Básicamente la tesis de Laplace, que con algún añadido también utilizó Herschel, era la siguiente: la atmosfera del Sol primordial se extendía a través de todo el espacio ocupado ahora por las órbitas planetarias; se trataba de una nube de gas caliente en rotación. Al irse enfriando esa nube, se fue contrayendo, pero entonces la conservación del momento angular (requisito recogido por la mecánica newtoniana) hizo que el gas rotase más rápidamente. Si se suponía que el gas giraba con un sólido rígido, como la velocidad angular sería entonces la misma independientemente de la distancia al centro, la velocidad lineal tendría que ser mayor en la periferia de la nube. Llegaría el momento en que la fuerza centrífuga (que tiende a alejar el punto del centro) en los extremos de la nube superaría a la fuerza de contracción gravitacional, con la consecuencia de que se separaría un anillo de gas del resto de la nube, que continuaría contrayéndose. De nuevo, se suponía que ese anillo de gas se reuniría en una gran esfera, que gradualmente se enfriaría condensándose para formar un planeta. Con el resto de la nube se irían produciendo efectos similares, que generarían otros planetas.

Con los conocimientos suministrados por las nucleosíntesis primordial y estelar, ahora se sabe que fue la condensación de hidrógeno y helio lo que dio origen al Sol y a los planetas gaseosos exteriores, Júpiter y Saturno, mientras que Mercurio, Venus, la Tierra y Marte son cuerpos sólidos. A pesar de su composición gaseosa, la masa del Sol constituye el 99, 86 % de la total del Sistema Solar, el 70 % de hidrogeno y el 28 % de helio. El núcleo, con un radio cercano a un cuarto de su dimensión total, una densidad 150 veces la del agua y una temperatura de 15, 7 millones de grados kelvin, es el medio en el que la fusión nuclear (síntesis de átomos de hidrógeno para formar helio) produce fotones que son absorbidos por otros átomos, proceso que se repite incesantemente antes de alcanzar la fotosfera, una capa de entre 100 y 200 km de espesor, observable desde la Tierra, que irradia luz y calor, y la corona, la parte superior de la atmosfera solar. La mayor parte de la radiación electromagnética se produce en la zona visible, el resto en la parte ultravioleta e infrarroja del espectro. El tiempo que tarda esa radiación en alcanzar la Tierra es de 8 minutos, en los que puede ser interceptada por los cuerpos

celestes, el gas interestelar y el polvo. La intensidad de la emisión es inversa a la distancia: al aumentar ésta en una unidad la intensidad se reduce a $1/4$; al triplicarse, a $1/9$. El viento solar es una corriente de plasma, protones y electrones procedentes de la corona solar que se mueven a una velocidad de 350 km/s.

La edad del Sol está estimada en alrededor de 4.500 M. a., y dentro de algo menos de 2.000 M. a., cuando se agote el hidrógeno de su núcleo, éste comenzará a contraerse y a calentarse hasta el punto de que se producirán reacciones químicas de fusión con helio (después del hidrógeno, el, recordemos, elemento más ligero) que harán que la esfera solar aumente su tamaño, convirtiéndose en lo que se denomina una «gigante roja». Esta fase de crecimiento durará poco en términos cósmicos: unos 10 M. a. Al finalizar, el radio del Sol será tan grande que habrá absorbido a Mercurio y Venus y, tal vez, también a la Tierra.

En la actualidad se obtienen datos muy precisos sobre los planetas del Sistema Solar utilizando la tecnología disponible. Así, midiendo cómo afecta al movimiento de un satélite la atracción de la gravedad de un planeta, se puede determinar su masa (empleando, por supuesto, las leyes newtonianas del movimiento). En el caso de nuestro planeta, también se puede medir su masa conociendo el periodo de la órbita de la Luna y la distancia de ésta a la Tierra, que se obtiene con precisión utilizando láseres.

Más complicado es obtener información acerca de la geología de los planetas. Dejando por el momento al margen a la Tierra, de la que nos ocuparemos en la siguiente sección, puede afirmarse que se ha obtenido mucha información gracias a los telescopios y a las sondas espaciales que se han ido enviando a los confines del Sistema Solar.

Con esas sondas y con telescopios instalados en la Tierra, se miden detalles como las trayectorias de los planetas, su rotación, los movimientos (tipo peonza) de oscilación de su eje, sus campos magnéticos o sus atmósferas, con los que se puede deducir cómo son sus interiores.

De Mercurio sabemos que su corteza es bastante delgada, con una densidad parecida a la de la Tierra, 5 g/cm^3 . Se cree que el 70 % de su masa está formado por

un núcleo de hierro (en parte en estado fluido) que ocupa casi tres cuartos del radio del planeta, lo que explicaría que, como la Tierra, posea un campo magnético.

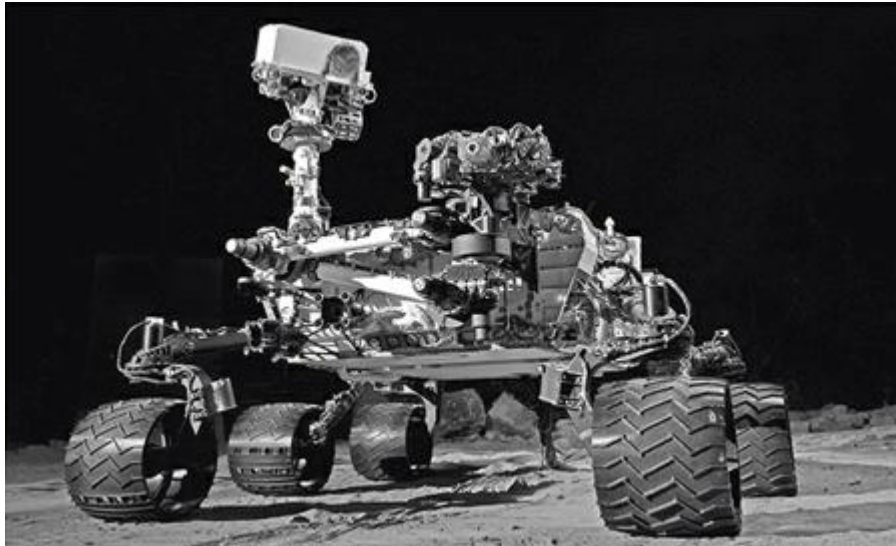
Planetas del Sistema Solar			
	Distancia media al Sol (millones de km)	Diámetro (km)	Masa (la de la Tierra = 1)
Mercurio	58	4.878	0,055
Venus	108	12.103	0,815
Tierra	149	12.752	1
Marte	228	6.786	0,108
Júpiter	778	143.000	317,9
Saturno	1.427	120.000	95,181
Urano	2.896	51.118	14,531
Neptuno	4.496	49.528	17,135

Al igual que la Luna, en su superficie abundan los cráteres (lo desveló la misión Mariner 10, lanzada en noviembre de 1973), y también existen profundos —de entre varios centenares de metros y tres kilómetros— taludes que se prolongan a lo largo de cientos de kilómetros.

El interior de Venus está estructurado en tres zonas: la primera es una capa de unos 20 km de espesor, luego viene un manto de materiales fluidos de 2.800 km, que rodea al núcleo central de material ferroso, con un radio de 3.200 km. Su superficie es parecida a la de un desierto rocoso, con extensas llanuras onduladas, depresiones y pocas montañas, aunque hay huellas de reciente actividad volcánica. Su característica principal es la de su atmósfera, pero de ella se hablará en la sección siguiente.

Marte ha sido y es un objetivo preferente de misiones espaciales no tripuladas de la agencia espacial estadounidense, la NASA. Una de ellas, bautizada con el nombre de Curiosity, despegó de la Tierra el 26 de noviembre de 2011, aterrizando en

Marte el 6 de agosto de 2012 y depositando un vehículo equipado con un laboratorio para estudiar la composición de la superficie marciana y buscar en ella rastros de vida.



Curiosity, vehículo diseñado por la NASA para la exploración de Marte, donde aterrizó el 6 de agosto de 2012

La superficie de Marte es árida, llena de cráteres, cañones que llegan a alcanzar los 4.000 km de longitud, y volcanes, algunos enormes como Olympus Mons (el volcán más grande del Sistema Solar, con una altura de 24 km y una base casi tan grande como la península ibérica). Posee un núcleo de materiales ferrosos de unos 1.500 km de radio, un manto de silicatos de en torno a 1.800 km y una corteza de 100 km. La temperatura de su superficie oscila según las estaciones, pero la media es de unos 50 °C bajo cero, lo que hace imposible la presencia de agua líquida en su superficie; se cree, no obstante, que existe agua congelada en su subsuelo, hasta profundidades de 1 km o más. Una explicación de la ausencia de agua líquida es que Marte no posee actividad geológica interna; esto es, que no se dan procesos que generan calor, como sucede en el interior de la Tierra, un hecho que se puede entender como consecuencia de que al ser más pequeño que la Tierra su núcleo hace tiempo que se enfrió. Imágenes enviadas por la misión Mars Express, lanzada

el 2 de junio de 2003 por la Agencia Espacial Europa (ESA, por sus siglas inglesas: European Space Agency), sugieren que la actividad volcánica terminó hace un millón de años, aunque aún se aprecia una ligera actividad sísmica. Sólo posee una placa tectónica, lo que explica la ausencia de grandes cadenas montañosas.

La composición de Júpiter, el más masivo de los planetas del Sistema Solar (en él cabrían 1.330 Tierras), se parece más al Sol que a la de los demás planetas, ya que está compuesto sobre todo de hidrógeno y helio. Se cree que su núcleo, que soporta presiones del orden de 8.000 millones de veces la presión que existe al nivel del mar en la Tierra, está formado por roca y hielo. Posee un campo magnético 12 veces superior al terrestre. Al contrario de lo que sucede en los planetas mencionados hasta ahora, Júpiter no tiene geografía; esto es, carece de estructuras geológicas del tipo de cráteres o montañas, asociados a elementos químicos de los que este gigante gaseoso no dispone. Mediciones de la energía que emite Júpiter muestran que equivalen a 1,5 veces la que recibe del Sol, lo que significa que su interior aún está activo: la contracción gravitacional que experimenta su masa produce esa energía.

El caso de Júpiter sirve también para mencionar que no sólo se puede hablar de la geología de los planetas, sino también de sus satélites. De los cuatro observados por Galileo en 1610, ahora conocidos como Io, Europa, Ganímedes y Calisto, se ha pasado a conocer más de 60. Gracias también a sondas espaciales, se ha comprobado que en Io existen volcanes y una zona denominada Loki Patera, una mancha oscura en forma de media luna que se cree un lago de azufre líquido cuya superficie está helada. Por su parte, Europa está cubierto por una lisa corteza de hielo, en la que se han descubierto fracturas que sugieren que debajo de esa capa helada pueden existir movimientos; acaso un océano subterráneo de agua líquida.

En cuanto a Saturno, el planeta rodeado de un espectacular conjunto de anillos, el segundo en tamaño tras Júpiter, con el que comparte una composición parecida, también su interior genera calor y posee un campo magnético. Urano tiene un núcleo rocoso de casi 17.000 km de diámetro, a una temperatura de unos 7.000 °C, al que rodea una región de agua densa, amoníaco (NH_3) y metano (CH_4) helados y

en estado gaseoso que da paso a una capa superficial formada sobre todo por hidrógeno y helio. Finalmente, está Neptuno, como Júpiter, Saturno y Urano, un planeta gaseoso cuyo núcleo sólido —compuesto de rocas de silicato y con un tamaño de unos 14.000 km— es más grande que su masa total.

§2. La Tierra

La Tierra es un planeta sólido, el tercero en relación al Sol y el más denso de los que componen el Sistema Solar. Según algunas teorías, a aproximadamente la misma distancia a que se encontraba del Sol también existía un protoplaneta, Theia, con una masa semejante a la de Marte. El choque de ambos se produjo hace 4.533 M. a. y produjo un intercambio de materia: Theia se unió a la Tierra, mientras que una parte de ésta salió impulsada hacia el espacio, donde se formó la Luna, retenida como satélite por la atracción de la Tierra. El impacto desplazó el eje terrestre, que formó un ángulo de 23, 50 con la vertical original, cambio que redujo la velocidad de rotación y alargó la duración del día. Durante cientos de millones de años la Tierra y la Luna estuvieron sometidas a un incesante bombardeo de cometas y asteroides que acabó con el impacto de cuatro asteroides gigantes de unos 1.000 km de diámetro cada uno, hace entre 4.100 y 3.800 M. a., cuya huella es manifiesta en la Luna, que carece de atmosfera, pero como la Tierra aún no se había solidificado por completo absorbió el efecto del impacto. Había llegado el fin del primer eón de la escala geológica, el eón hádico, del que no hay ningún registro biológico. Duró unos 560 M. a. y dejó paso al eón arcaico.

Escalas geológicas de tiempo

La historia de la Tierra se ha dividido en una serie de eras geológicas, la escala de tiempo geológico. Para establecer tales eras se ha recurrido a los caracteres físicos, y especialmente a la naturaleza de los fósiles que aparecen en los estratos geológicos que caracterizaban cada periodo (el orden de los estratos permitió crear la primera cronología). Obviamente, se trata de un problema complejo, que depende mucho de las técnicas de datación disponibles. La más precisa es la radiométrica, que utiliza isótopos radiactivos. La táctica es determinar la cantidad presente de un cierto elemento radiactivo en una muestra y tomar como patrón de comparación la vida media del elemento. El más popular es el basado en el carbono-14, que estuvo disponible a partir de 1949, cuando lo introdujo el químico estadounidense Willard Libby, pero su problema es que la vida media del carbono-14 es únicamente de unos 5.730 años. Otros elementos disponen de isótopos con vidas medias más largas: la del uranio-238 es de 4.470 M. a., la del torio- 232, 14.000 M. a., y la del potasio-40, 1.250 M. a. En cuanto a los nombres asignados, la casuística ha sido muy variada. Así, el nombre del periodo denominado Cretácico deriva de «creta», que significa «tiza», y fue definido por el geólogo belga Jean d'Omalius d'Halloy, en 1822, basándose en datos de estratos de la cuenca parisina, mientras que Jurásico procede de formaciones sedimentarias carbonadas de una región de los Alpes, el Jura. En el tercer tomo de los *Principles of Geology* (1833), Charles Lyell propuso dividir uno de los periodos que utilizaba, el Terciario, en tres series: Eoceno (del griego eos, «aurora», «comienzo», y *kainós*, «reciente»), Mioceno (de *meios*, «menos»), y Plioceno (de *pleios*, «más»), nomenclaturas que aún persisten. De acuerdo con la Comisión Internacional de Estratigrafía, la escala de tiempo geológico es la siguiente (en negrita, los eones, en cursiva, las eras, en redonda, los periodos, y entre comillas [« »], las épocas):

- **Hádico** (anterior a hace 4.000 M. a.).
- **Arcaico**. Dividido en *Eoarcaico* (4.000-3.600 M. a.), *Paleoarcaico* (3.600-3.200 M. a.), *Mesoarcaico* (3.200-2.800 M. a.) y *Neoarcaico* (2.800-2.500 M. a.).
- Proterozoico, que se divide en: *Paleoproterozoico*, a su vez subdividido en Sidérico (2.500-2.300 M. a.), Riásico (2.300-2.050 M. a.), Orosírico (2.050-1.800 M. a.) y Estatérico (1.800-1.600 M. a.). *Mesoproterozoico*: Calímico (1.600-1.400 M. a.), Ectásico (1.400-1.200 M. a.) y Esténico (1.200-1.000 M. a.). *Neoproterozoico*: Tónico (1.000-720 M. a.), Criogénico (720-635 M. a.) y Ediacárico (635-541 M. a.).
- **Fanerozoico**, que se divide en: *Paleozoico*: Cámbrico (541-485 M. a.), Ordovícico (485-443 M. a.), Silúrico (443-419 M. a.), Devónico (419-358 M. a.), Carbonífero (358-299 M. a.) y Pérmico (299-252 M. a.). *Mesozoico*: Triásico (252-201 M. a.), Jurásico (201-145 M. a.) y Cretácico (145-65, 5 M. a.). *Cenozoico*: (1) Paleógeno, subdividido en «Paleoceno» (65, 55, 8 M. a.), «Eoceno» (55, 8-34 M. a.) y «Oligoceno» (34-23 M. a.); (2) Neógeno, subdividido a su vez en «Mioceno» (23-5, 33 M. a.) y «Plioceno» (5, 33-2, 5 M. a.), y (3) Cuaternario, subdividido en «Pleistoceno» (2, 5 M. a.-11.748 años) y «Holoceno» (11.748 años- presente).

Gran parte de lo que sabemos acerca del interior de la Tierra procede de la sismología, el estudio de ondas producidas por terremotos o por explosiones provocadas, que viajan a través del interior de la Tierra, cambiando de velocidad según atraviesan las diferentes capas existentes en el interior terrestre. Al recorrer distancias distintas, las ondas en cuestión llegan a los diferentes detectores instalados en las estaciones sismológicas establecidas en todo mundo en tiempos distintos, lo que permite construir una imagen de la estructura interior del planeta.

Gracias a ello sabemos que existen varias capas en el interior de la Tierra. En primer lugar, una corteza relativamente pequeña (entre 5 km en los fondos oceánicos y hasta 70 en las zonas montañosas más activas), formada en general por rocas ligeras. Luego viene el manto, que constituye el 80 % de la Tierra, compuesto de silicatos de hierro y manganeso, que se extiende hasta unos 2.900 km de profundidad (la capa superficial, el manto más la corteza, es la litosfera). Finalmente está el núcleo, formado sobre todo por hierro, en parte sólido y en parte líquido, y en menor cantidad por níquel.

Recubriendo la parte central del núcleo, hay otra zona que es líquida: a una temperatura de unos 5.000 °C, la mezcla de hierro y níquel se licúa, produciéndose corrientes que son las responsables de que exista un campo magnético en torno a la Tierra (no todos los planetas del Sistema Solar poseen un campo magnético: Marte, por ejemplo, carece de él; es un planeta más pequeño que la Tierra y, como ya hemos señalado, su núcleo se enfrió hace mucho, eliminando así corrientes de metales líquidos como las que en nuestro planeta producen el campo magnético).

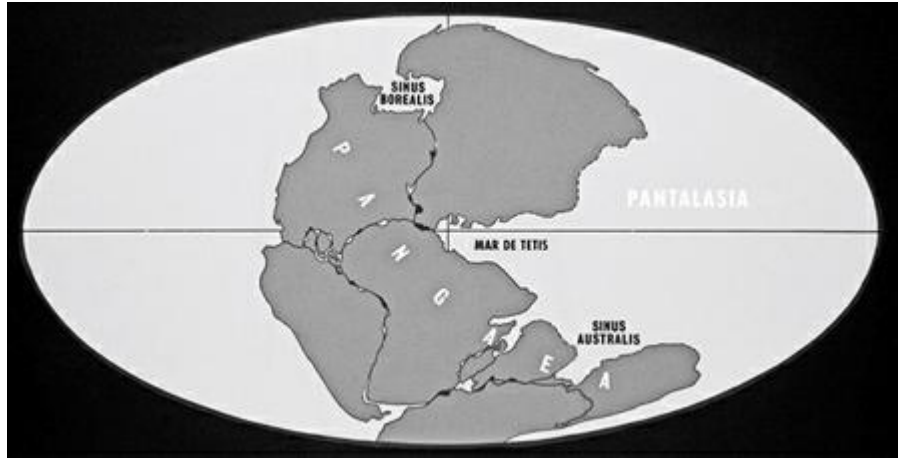
El que la Tierra esté rodeada por un escudo magnético protector, la magnetosfera (descubierta en 1958 gracias a medidas realizadas por el satélite Explorer 1), constituye una suerte, ya que desvía radiaciones o partículas que se dirigen hacia la superficie terrestre, como las emitidas en las erupciones solares o las provenientes del denominado «viento solar», formado por electrones, protones y, en menor medida, núcleos de algunos elementos, que escapan de la atmósfera solar. Las espectaculares auroras boreales y australes son producto de esta dinámica espacial. Pero, aunque el total de la energía emitida en una erupción solar es mucho menor que la que emite el Sol en un segundo, puede tener efectos muy perjudiciales. En la bibliografía astronómica, la erupción solar más potente que se ha registrado es la observada con un telescopio óptico (aún estaba lejos la llegada de la radioastronomía) por el astrónomo Richard Carrington el 1 de septiembre de 1859. En nuestro mundo actual, altamente tecnificado, las consecuencias pueden ser muy importantes: podrían afectar, por ejemplo, a los satélites artificiales que orbitan alrededor de la Tierra, puesto que una parte de los rayos X emitidos en la erupción

aumenta la ionización en las capas superiores de la atmósfera terrestre, produciendo interferencias en las comunicaciones de radio de onda corta, así como pérdidas de altura en satélites situados en órbitas bajas (entre ellos, los satélites que mantienen el Sistema de Posicionamiento Global, GPS).

A medida que aumenta la profundidad, crece la temperatura (cada 100 m de profundidad, la temperatura aumenta unos 50 °C; durante una perforación en el Alto Palatinado alemán, en la que se penetró hasta 9 km, se midió una temperatura de 270 °C). A ese calor interno se deben procesos como las erupciones de los volcanes o los movimientos de la corteza terrestre. Aunque parezca que la superficie terrestre, los continentes en particular, están fijos, anclados en zonas determinadas y únicamente afectados por fenómenos como la erosión del viento o del agua, no es así. Fue el meteorólogo y geofísico alemán Alfred Wegener (1880-1930) quien defendió con más énfasis y datos esta teoría, primero en 1912 y después en un libro que publicó en 1915, *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane (El origen de los continentes y océanos)*. Sostenía, entre otras cosas, que durante el Pérmico (hace más de 250 M. a.) y el Triásico (hace entre 245 y 208 M. a.) los bloques continentales que hoy conocemos estaban agrupados en un gran continente, al que denominó Pangea. Más tarde, en el Jurásico (hace entre 208 y 144 M. a.), apareció la primera fisura entre Europa y África, iniciándose un proceso que ha conducido a la geografía continental actual.

Las ideas de Wegener eran atractivas y contienen su buena parte de verdad, pero les faltaban aún elementos muy importantes, elementos que llegaron cuando se dispuso de mejores medios para analizar la estructura terrestre, incluyendo los fondos marinos. Surgió así finalmente la denominada «tectónica de placas», según la cual no son sólo los continentes los que se mueven, sino zonas más extensas de la corteza terrestre («placas») que incluyen asimismo partes de los océanos. Las placas (seis grandes y varias más pequeñas) se mueven sobre estratos más profundos, siendo la fuerza motriz lentas corrientes de magma viscoso, generado gracias al calor que procede del núcleo terrestre (el magma es el material fundido que existe en el interior de la Tierra, a partir del cual se forman las rocas ígneas; la

lava es magma que ha alcanzado la superficie y que se solidifica perdiendo algunos de sus componentes en el camino).



Pangea, el supercontinente que se supone debió existir antes de que se rompiera y comenzasen a formarse los continentes actuales

El océano Atlántico puede servir para ilustrar la nueva imagen: el continente americano estuvo unido en el pasado a Euro-África, pero Europa y África comenzaron a separarse durante el Mesozoico (hace 245-265 M. a.). Hasta aquí nada difiere de las ideas de Wegener, aunque para éste la dorsal atlántica, la cadena montañosa situada en mitad del océano y en cuya parte central existe un profundo valle o hendidura, no representaba nada especial, simplemente marcaba el lugar de separación entre continentes. Sin embargo, para la tectónica de placas esa dorsal significa una zona dinámica, la frontera entre dos placas, donde se crea constantemente nuevo fondo oceánico fruto del flujo de magma que surge de las profundidades de la corteza terrestre. El ritmo al que se crea ese fondo es el mismo al que aumenta la distancia entre los tres continentes (América, Europa y África). Para Wegener, el fondo marino era antiguo, mientras que, según la tectónica de placas, es joven, especialmente en la zona central; su antigüedad aumenta al alejarse de la dorsal atlántica, que separa las dos placas. Y como la Tierra no aumenta de tamaño, la masa que se va creando y añadiendo a una placa la empuja, movimiento que, además de alejar los continentes, puede conducir a que dos placas

choquen. Cuando esto ocurre, existen dos posibilidades principales: la placa más densa puede verse forzada a introducirse bajo la menos densa, de manera que su masa se funde y forme magma, que puede ascender de nuevo a la superficie a través de grietas y dar lugar a volcanes; o, si las dos placas son comparables, la corteza se arruga de forma gradual, formándose cadenas montañosas como el Himalaya, los Andes o las Montañas Rocosas. Sin embargo, también existe otro proceso: a veces, dos placas se deslizan entre sí; el caso más conocido es el de la falla de San Andrés, en California, donde el movimiento de las placas se asemeja en ocasiones a un latigazo repentino que provoca un terremoto.

Vemos así una de las causas, precisamente, de los terremotos, esos movimientos violentos de la corteza superficial de la Tierra que despliegan una gran energía. La cordillera del Himalaya, donde se encuentran las montañas más altas de la Tierra, como el Everest, surgió hace unos 50 M. a., cuando las placas de India y Asia, separadas hasta entonces por un océano, chocaron. Todavía hoy se da este fenómeno: entre India y el resto de Asia se producen movimientos de placas que hacen que la región continúe elevándose y provocan tensiones y terremotos que llegan hasta el interior de China.

En lo que se refiere a los volcanes, la teoría de la tectónica de placas ofreció una interpretación mucho más adecuada que la sostenida en el pasado, que se limitaba a entenderlos como mecanismos para expulsar el calor acumulado en el interior de la Tierra. La tectónica de placas es mucho más sofisticada. Acabamos de señalar que en las zonas fronterizas entre placas, además de surgir magma de las profundidades terrestres, se produce un proceso de subducción, es decir, las rocas son empujadas al interior de la Tierra. Si se dibuja un mapa de las principales erupciones volcánicas del pasado, se comprueba que tuvieron lugar en esas zonas limítrofes entre placas, algo no sorprendente si tenemos en cuenta que son las áreas más frágiles de la corteza terrestre, aunque es cierto que también existen o han existido volcanes en lugares alejados de los bordes de las placas y que aprovechan estrechas cámaras verticales por las que asciende el magma.

Pero volvamos a la superficie terrestre y a cómo y por qué cambia. Las primeras

sospechas de la existencia de tal cambio proceden de Plinio el Viejo, que explicó la formación del ámbar como resina fósil. En la China del siglo XI, Shen Kuo describió el papel de la sedimentación y la erosión en la configuración de la corteza terrestre. Los árabes mostraron un interés especial por las piedras y las rocas. A comienzos de la citada centuria, Avicena describió en su enciclopedia *Kitab al-Shifa* la sedimentación de los estratos. En *De solido intra solidium naturaliter contento dissertationis prodromus*, también conocida como *De solido* o *El Pródromus* (1669), Nicolás Steno, un naturalista danés, asumió la sugerencia de Descartes de escribir una historia de la corteza terrestre a partir de la información que ofrecía la observación, o «en qué medida la condición presente de una cosa descubre su condición pasada». Describía, en particular, las diferencias entre el desarrollo de los sólidos inorgánicos, como los cristales, y el de los sólidos orgánicos, como las conchas o los huesos, e identificaba el origen de las rocas que alojaban a los fósiles como sedimentos blandos que se habían convertido en rocas después de haber quedado enterrados en ellos conchas y huesos. Al interpretar los estratos, Steno llegó a la conclusión de que éstos se habían depositado, capa a capa, a lo largo del tiempo; que si existió una horizontalidad originaria, ésta se habían quebrado con el tiempo. Asimismo, de sus observaciones en Italia concluyó que los fósiles tenían su origen en el mar, lo que implicaba la emergencia de los fondos marinos; esto es, algún tipo de evolución.

En el siglo XVIII, Buffon dedicó una parte de su enciclopedia a los minerales y la geología, explicando la formación de la Tierra por la constante acción de las fuerzas naturales en lugar de la creación en un momento dado (también observó similitudes entre los hombres y los simios, y describió un método para la transformación orgánica a partir de «partículas orgánicas»). William Smith, un hijo de un herrero de Churchill (Inglaterra) que se convirtió en topógrafo y se dedicó sobre todo a trabajar en la construcción de canales, publicó en 1815 el primer mapa geológico de la Gran Bretaña. Gracias a sus trabajos topográficos, se dio cuenta de que ciertos fósiles parecían encontrarse siempre en determinados estratos rocosos, en una secuencia que se repetía en lugares diferentes; mostró, en definitiva, la

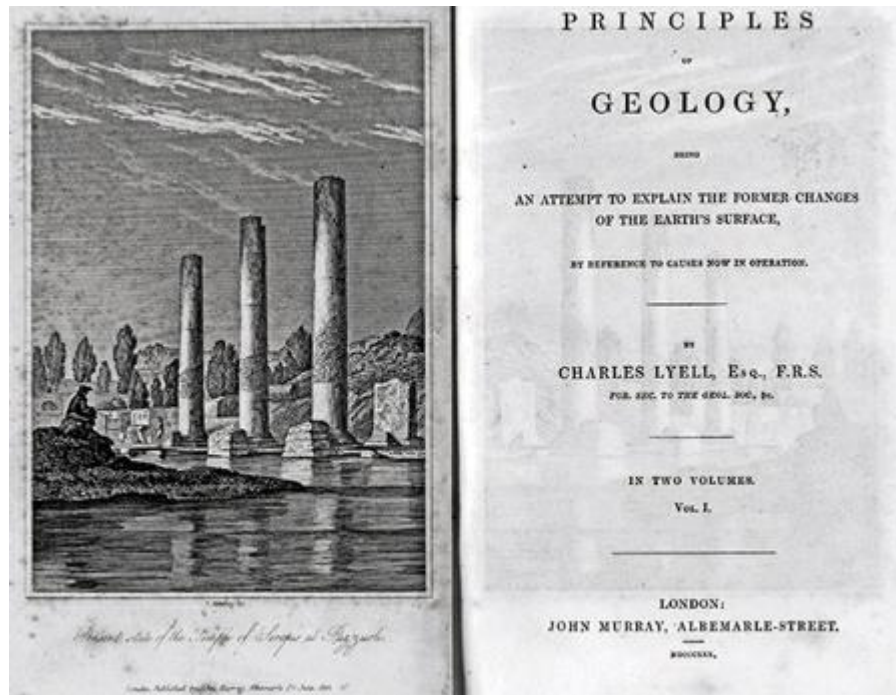
correlación entre determinados estratos y la fauna fósil que contenían. La estratigrafía, que como vemos nació de intereses prácticos, se convirtió así en uno de los principales instrumentos para reconstruir la historia de la Tierra.

Elementos como éstos necesitaban de una base teórica geológica organizada. Antes incluso de que Smith proveyese de datos detallados de la geología de Gran Bretaña, un escocés, James Hutton (1726-1797), había avanzado por esa senda teórica, defendiendo —en particular en un libro en tres volúmenes titulado *Theory of the Earth with Proofs and Illustrations (Teoría de la Tierra con pruebas e ilustraciones; 1795-1797)*— la teoría plutónica, según la cual la causa de los cambios observados en la Tierra se debe a su calor interno, a la acción combinada de la actividad volcánica y la erosión, teoría que se oponía a la neptuniana, defendida sobre todo por el geólogo alemán Abraham Gottlob Werner (1749-1817). La explicación que ofreció Werner en su *Kurze Klassifikation und Beschreibung der verschiedenen Gebirgsarten (Breve clasificación y descripción de las rocas; 1787)*, influida por el relato bíblico, fue que la Tierra había estado cubierta originariamente por el agua, por un océano primitivo, pero que, debido a la presencia en éste de materiales en suspensión, se habría producido un proceso mecánico de sedimentación de esos materiales, que produjo la corteza terrestre (distinguía cinco tipos de roca: primitiva, de transición, estratificada, aluvial y volcánica). Imaginaba una situación originaria en la que un gran océano, en el que se había disuelto la materia, envolvía un centro sólido. Por otra parte, recurría a las erupciones volcánicas para explicar las fracturas presentes en los sedimentos. Advertamos que, al recurrir a la noción de sedimentación, Werner estaba introduciendo la idea de que la corteza terrestre estaba constituida por capas geológicas formadas a lo largo del tiempo, de un tiempo geológico; distinguió cuatro periodos: primario, secundario, terciario y cuaternario, que se usaron hasta bien entrado el siglo XX. De esta manera, aparecía una nueva rama de la geología: la estratigrafía, que no se perfeccionó hasta la llegada de la datación radiactiva.

En su *Theory of the Earth*, Hutton describió el ciclo de las rocas: la secuencia que convierte el magma de las explosiones volcánicas en rocas ígneas, que el agua y la

erosión disolvían antes de que se dispusieran en estratos continuos: rocas sedimentarias, antes de que el calor y la presión las convirtiesen en metamórficas. En Gneis Acasta, una formación geológica de gneis hadeico situada en el noroeste del Canadá, las rocas son metamórficas y tienen una antigüedad de 4.000 M. a. Las rocas sedimentarias más antiguas proceden de Issua (Groenlandia) y datan de 3, 8-3, 7 M. a.

Muy importante es que Hutton sostuviera que los procesos a los que recurría no se habían detenido. Estaba esbozando, como antes que él habían hecho otros (Avicena, Fushsel), aunque mostrando menos recursos geológicos, el principio del uniformismo, la tesis de que la acción de las leyes naturales es igual a través del tiempo. Una idea que contenía tres supuestos esenciales: los procesos físicos son iguales y se producen del mismo modo, son iguales en intensidad y ocurren por la misma razón. Pero con quien el principio del uniformismo llegó a su máxima expresión fue con Charles Lyell (1797-1875), que lo hizo suyo sintetizándolo en una afortunada frase: «el presente es la llave del pasado». Las tesis y observaciones de Lyell aparecieron en un libro capital, *Principies of Geology (Principios de geología)*, significativamente subtítuloado *An Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface (Un intento de explicar los cambios precedentes en la superficie de la Tierra)*, cuyo primer tomo se publicó en 1830 y el tercero y último, en 1833. Da idea de la influencia que llegó a ejercer esta obra el que Lyell viviese para ver la publicación de trece ediciones revisadas.



Portada del primer tomo (1830) de Principles of Geology, de Charles Lyell

Naturalmente, no se trataba sólo de proponer la idea de la acción continua de los elementos, sino de utilizarla para explicar todo lo que vemos en la Tierra, como montañas, sedimentos, fallas, mesetas, estuarios, cuencas oceánicas, lenguas glaciares o volcanes, tarea en la que Lyell fue un maestro. Leyó e interpretó la superficie terrestre como nadie antes lo había hecho, demostrando que no es necesario recurrir a causas extraordinarias. Entre las conclusiones a las que llegó Lyell una es particularmente importante: aumentó la edad de la Tierra hasta los 300 M. a.; de hecho, sustituyó los periodos de Werner por las eras, Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, en función de la antigüedad de los fósiles propios de cada una.

Pero existían problemas para la tesis uniformista. Entre los que se distinguieron por combatir las ideas uniformistas se encuentra William Thomson, lord Kelvin, quien en un artículo que publicó en 1865 escribía:

La «Doctrina de la Uniformidad» en geología, según es sostenida por muchos de los más eminentes geólogos británicos, supone que la superficie

de la Tierra y su corteza superior han sido durante millones de años, aproximadamente, igual a como son en la actualidad, en temperatura y otras propiedades físicas. Pero sabemos, mediante observaciones, que el calor que emite la Tierra cada año es tan grande que si esta acción hubiese continuado operando con algún grado de uniformidad durante 20.000 millones de años, la cantidad de calor perdida por la Tierra habría sido casi tanta como la que calentaría, en 100o centígrados, una cantidad de superficie rocosa de 100 veces el tamaño de la Tierra. Esto habría sido más que suficiente para fundir una masa de superficie rocosa igual en dimensión a toda la Tierra. Ninguna hipótesis relativa a acción química, fluidez interna, efectos de la presión a gran profundidad, o carácter posible de las sustancias del interior de la Tierra, que posea el menor vestigio de probabilidad, puede justificar la suposición de que la corteza superior de la Tierra ha permanecido aproximadamente igual a como es en la actualidad, mientras que a través de toda o de parte de la Tierra se ha perdido una cantidad de calor tan grande.

Se trataba de un problema de la edad de la Tierra, una cuestión con una larga historia detrás. James Ussher (1581-1656), arzobispo de Armagh y primado de Irlanda, anunció en 1650, después de sumar las largas vidas de los descendientes de Adán, que la Tierra tenía 4.004 años cuando nació Jesús, más concretamente, el 23 de octubre, a mediodía, dato que recogieron las ediciones posteriores de la Biblia. Kepler y Newton confirmaron el cálculo, en tanto en el siglo XVIII la *Guía de forasteros* de Madrid, seguramente por el mismo medio, elevó su edad a los 5.200 años. Por su parte, Buffon calculó experimentalmente el tiempo necesario para que esferas metálicas de distinto diámetro calentadas al rojo alcanzasen la temperatura actual de la Tierra, obteniendo como resultado 10 M. a., que dejó en 74.000 años. «Es conveniente reducirlo todo lo posible para adaptarlo a la capacidad limitada de nuestra inteligencia».

Kelvin sostenía que según la física entonces conocida (y él pensaba que ésta era

básicamente la definitiva) se necesitaba mucho más tiempo para los procesos geológicos que el que las leyes físicas permitían para la historia terrestre. En un aspecto, Kelvin tenía razón: la física newtoniana no encajaba con la geología uniformista. Pero estos problemas se resolverían con el descubrimiento de la radiactividad: elementos radiactivos presentes en el interior de la Tierra suministran el calor que Kelvin trataba de explicar mediante procesos físicos newtonianos. La zona radiactiva terrestre se concentra en la parte más cercana (1.200 km de radio) a su núcleo: a pesar de que el núcleo terrestre está formado sobre todo por hierro y níquel, también contiene uranio y torio, dos elementos radiactivos que son los que producen el calor interno.

Hemos hecho hincapié en la parte sólida de la Tierra, pero su superficie está formada en gran parte, cerca del 71 %, por mares y océanos líquidos. La presencia del agua en grandes cantidades y en los tres estados distingue a la Tierra de los otros planetas. El origen del agua que se encuentra en ella se atribuye a dos fenómenos complementarios: por un lado, el bombardeo de cometas y asteroides en cuya composición entraba el agua en grandes proporciones, si bien en 2014 la sonda Rosetta descubrió que la composición del vapor de agua de los cometas era distinta de la que se encuentra en la Tierra; por otro, la desgasificación del interior del planeta por las erupciones volcánicas habría contribuido a su abundancia. Aunque el agua tiene una composición definida (H_2O) y unas propiedades características —incolora, inodora e insípida—, la disolución en ella de determinados elementos como la sal hace que se distinga el agua salada (97 %) de la dulce (3 %). Los océanos se formaron hace 4.000 años con una profundidad media superior a los 4 km y un volumen de 1.386 millones de km^3 . El ciclo del agua se caracteriza por la presencia más o menos prolongada de ésta en los distintos estados de la materia. Las moléculas de vapor de agua en la atmósfera se condensan al cabo de nueve días, las gotas de agua de los océanos se mantienen durante 3.600 años. De la lluvia que cae sobre la corteza terrestre, la que se hiela en los casquetes polares permanece durante 20.000 años, la que penetra profundamente en el suelo no pasa de los 200 años, la que forma los ríos no

conserva su condición más allá de seis meses. El ciclo del agua incluye tres fenómenos: la evaporación, la condensación y la precipitación. La evaporación y la condensación contribuyen a eliminar la materia disuelta y mantienen la cantidad de agua dulce. En la superficie de los océanos la rotación de la Tierra produce el movimiento de las corrientes, que se mueven circularmente. Al acercarse al ecuador, el agua se calienta y al alejarse se enfría. El sentido del movimiento de las corrientes era decisivo cuando solo se conocía la navegación a vela.

Y está también la atmosfera, la cubierta gaseosa que envuelve la Tierra y protege la vida de la radiación solar, y cuya composición varió a lo largo del tiempo. La atmosfera primitiva estaba formada por los elementos más ligeros de la nebulosa solar, hidrogeno y helio. Al ir acompañada la formación de la corteza terrestre de erupciones volcánicas, los gases emitidos formaron una segunda atmósfera, compuesta por dióxido de carbono (96,5 %) e hidrógeno.

Aunque en la actualidad nos horroriza el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera debido a la acción humana, en los primeros tiempos terrestres la abundancia de este gas fue una bendición. La razón es que la luminosidad del Sol no era la actual, sino un 30 % menor (al igual que un organismo vivo, las estrellas también cambian a lo largo del tiempo como consecuencia de la dinámica de los procesos termonucleares que tienen lugar en su interior). Si la atmósfera de la Tierra hubiese tenido la composición actual, entonces, al recibir un 70 % de la luminosidad solar actual, toda la superficie terrestre habría estado helada. Fue la abundancia de CO₂, y el consiguiente efecto invernadero que ello ocasionó, lo que hizo posible que la temperatura no llegase a semejantes mínimos, permitiendo así que se desencadenasen los procesos químico-físicos que condujeron a la aparición de la vida tal y como la conocemos.

§3. Fotosíntesis y efecto invernadero

El mencionado efecto invernadero es un fenómeno que, efectivamente, ha adquirido una gran importancia en nuestro planeta. Está relacionado con el ciclo del carbono en la Tierra, la secuencia de intercambios entre los cinco grandes depósitos

de carbono: atmósfera, biosfera (región en la que residen los seres vivos), océanos, sedimentos fósiles y manto terrestre. El carbono se encuentra, como acabamos de señalar, en la atmósfera, como dióxido de carbono. Las plantas, algas y bacterias consumen dióxido de carbono, que toman del aire o el agua para convertirlo en oxígeno y azúcares (fotosíntesis); los animales, a su vez, consumen estos azúcares y emiten dióxido de carbono en la respiración.

El conocimiento de la fotosíntesis se inició con el aislamiento en 1817 por los químicos Pierre Joseph Pelletier y Joseph Bienaimé Caventou del pigmento verde de las hojas de las plantas, al que llamaron «clorofila» (del griego *chloros*, «verde», y *fyton*, «hoja»). En 1845, Robert Mayer demostró que la energía procedente de la fotosíntesis era más que suficiente para garantizar el mantenimiento de la vida, y que no había, por tanto, necesidad de suponer la existencia de una fuerza vital. Por su parte, Julius von Sachs publicó en 1865 un *Handbuch der Experimentalphysiologie der Pflanzen* (*Manual de fisiología experimental*) en el que describió la presencia de cloroplastos en el citoplasma de las plantas, asunto en el que profundizó en 1887 al afirmar que, al captar la luz solar, iniciaban el proceso de la fotosíntesis. La estructura química de la clorofila fue descubierta por Richard Willstätter en 1913.

Volviendo al ciclo del carbono, si bien el dióxido de carbono es necesario para la vida de las plantas, su exceso se convierte en un problema, ante la imposibilidad de ser absorbido por la vegetación existente. Sucede entonces que la radiación térmica que emite la superficie terrestre (producto de la radiación solar) es absorbida por el CO₂, siendo devuelta parte de ella a la atmósfera, lo que origina un aumento de temperatura del aire. Es el citado efecto invernadero que según gran número de indicios está produciendo un cambio climático en la Tierra.

En el efecto invernadero no interviene únicamente el dióxido de carbono, aunque éste sea responsable de alrededor del 80 % del total de las emisiones de gases que lo generan; también tienen efectos semejantes el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y el vapor de agua, al igual que un grupo de gases producidos en la industria (el hexafluoruro de azufre, por ejemplo, generado en los sistemas de transmisión y

distribución eléctrica). En principio, los gases de efecto invernadero no son forzosamente malos. De hecho, es necesario que tengan una cierta presencia para que exista la vida, al menos nuestra vida: sin ellos, la temperatura promedio de la superficie de la Tierra rondaría los $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$; con ellos, esa temperatura es, o debería ser, en condiciones naturales, de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. El problema es el extraordinario aumento de dichos gases, especialmente el dióxido de carbono, debido a nuestras actividades. Cuando quemamos combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) en nuestras casas, automóviles, fábricas y plantas eléctricas, o cuando producimos cemento, liberamos CO_2 a la atmósfera.

Las plantas, entre ellas los árboles, son uno de los mejores antídotos para luchar contra el efecto invernadero, puesto que absorben CO_2 . Sucede, sin embargo, que una de las actividades a las que los humanos nos hemos dedicado con más intensidad desde hace siglos es la destrucción de bosques y selvas, y de ello es buen ejemplo la deforestación que sufre la Amazonia. Semejante destrucción tiene además otras consecuencias: en la atmósfera que recubre los bosques se produce una mayor evaporación de agua que sobre praderas o superficies desprovistas de vegetación, con el resultado de que el aire que rodea a éstas últimas contiene menos vapor de agua que el de bosques y selvas, lo que significa menos lluvia. Asimismo, un bosque refleja entre un 12 y un 15 % de la luz solar que cae sobre él, mientras que una pradera refleja el 20 % y un desierto, el 40 %. La mayor energía solar que absorbe una zona con abundante vegetación tiende a estimular corrientes de convección y otras dinámicas en la atmósfera, conduciendo a la producción de lluvia, de modo que ésta se reduce igualmente cuando desaparecen los bosques.

Junto a los árboles, otro gran antídoto son las algas marinas (plancton), que también utilizan dióxido de carbono. Pero, a medida que los océanos se calientan, el área cubierta por aguas pobres en nutrientes crece, de modo que el océano se está convirtiendo en un lugar inhóspito para las algas, lo que ralentiza el ritmo de reducción de dióxido de carbono en la atmósfera.

Ya a mediados del siglo XIX el físico británico John Tyndall se dio cuenta de la importancia que para la temperatura de la atmósfera podían tener componentes

como el gas de hulla, un producto industrial que se utilizaba entonces en el alumbrado. En realidad, lo que Tyndall pretendía en sus trabajos era explicar por qué se habían producido en el pasado las eras glaciales que identificaron los geólogos, en las que grandes regiones de la Tierra habían estado sepultadas bajo inmensas capas de hielo. Cuestiones como el efecto invernadero no le importaban o, mejor dicho, no existían para él. Cuarenta años después, al tratar de justificar las «edades de hielo» calculando los cambios de temperatura a partir de variaciones en concentraciones de dióxido de carbono, el químico-físico sueco Svante Arrhenius predijo que la producción industrial de ese gas protegería al globo terrestre de nuevas eras glaciales y permitiría el aumento de la producción de alimentos para una población mundial creciente.

Conclusiones como estas eran correctas, y no se debe acusar a los científicos que las propusieron de falta de perspectiva. Aunque una de las características de la ciencia sea su capacidad predictiva, con frecuencia los científicos no consideran que las situaciones cambiantes debidas a factores sociales puedan afectar en el futuro a sus predicciones. Cuando se valoraba cuáles eran los agentes de un posible cambio climático, los elementos que se solían tomar en consideración eran el vulcanismo, las variaciones en la órbita terrestre (que afectarían a la radiación solar recibida) o los efectos del vapor de agua en la atmósfera, un elemento este que oscureció al papel del dióxido de carbono, hasta que el ingeniero inglés Guy Callendar publicó una serie de artículos, entre 1938 y 1961, en los que señalaba la influencia antropocéntrica en la presencia de dicho gas en la atmosfera.

Y puesto que ha salido a colación la glaciación, mencionaremos que en 1837, de acuerdo con las tesis uniformistas de Lyell, el geólogo suizo afincando posteriormente en Estados Unidos, Louis Agassiz descubrió que las huellas de los glaciares se extendían más allá de su posición actual, lo que hizo posible que finalmente se identificasen cinco glaciaciones: la huroniana, entre hace 2.700 y 2.300 M. a., en los periodos geológicos conocidos como Sidérico y Riásico; la segunda, en el Criogénico (850-635 M. a.); la tercera, entre el Ordovícico y el Silúrico, de corta duración (450-420 M. a.); la cuarta, entre el Carbonífero y el

Pérmico (360-260 M. a.), y la última, en el Neógeno, que comenzó hace 2, 5 M. a. y que lleva trazas de ser interrumpida por el calentamiento global. En 1923, el geógrafo, meteorólogo, climatólogo y botánico ruso Wladimir Peter Koppen construyó una representación sistemática de los tipos de clima existentes en el mundo en función de la temperatura —tropical, seco, templado, continental y frío— y la humedad.

§4. Oxígeno en la atmósfera terrestre y formas primitivas de vida

Adelantándonos a un tema de un capítulo posterior, diremos que una de las formas primitivas de vida que aparecieron en la Tierra fueron unas células procariotas (sin núcleo) denominadas «cianobacterias», que aparecieron hace unos 2.700 M. a., provistas de pigmentos fotosintéticos que permitían captar energía del Sol y fabricar azúcares, una fuente alimenticia renovable. Nos estamos refiriendo a la ya citada fotosíntesis. Consecuencia de su aparición fue la liberación de oxígeno libre a la atmósfera terrestre, hasta entonces anaeróbica. Esto no implicó, sin embargo, que se acumulase mucho oxígeno libre en la atmósfera —afortunadamente para los procariotas anaeróbicos, para los que el oxígeno era venenoso—, puesto que la superficie de la Tierra lo tomaba y formaba con él óxido de hierro, mediante un proceso sin el cual la superficie y primeras capas del planeta serían muy diferentes a como son hoy, que duró alrededor de 1.200 M. a., hasta que se saturaron los depósitos de hierro. Entonces sí que comenzó a acumularse en la atmósfera oxígeno libre (O₂), iniciándose así el proceso de cambio de su naturaleza, de anaeróbica a aeróbica.

La disponibilidad de oxígeno, aunque fuese en cantidades no excesivamente abundantes, representó un cambio tremendo; facilitó enormemente que los aleatorios, competitivos, mecanismos evolutivos pudiesen inventar nuevas formas de vida, formas de vida como las plantas, que son capaces de realizar la fotosíntesis. Estas plantas sí que cambiaron el mundo terrestre. No sólo enriquecieron considerablemente de oxígeno la atmósfera de la Tierra, sino que se convirtieron en el eslabón que unió vitalmente a plantas y animales. El porqué de

semejante unión es fácil de comprender: hasta entonces los únicos organismos que podían aportar algo de nutrientes a la superficie de la Tierra eran bacterias con pigmentos fotosintéticos, pero era poco lo que contribuían en este sentido; prácticamente toda la nutrición de los seres vivos dependía de las moléculas inorgánicas presentes en la naturaleza. Con la llegada de las plantas fotosintéticas se dispuso de una fuente natural (un organismo biológico) de producción de energía renovable que utilizaba como motor la energía procedente del Sol. Para las plantas, un producto de desecho de la fotosíntesis es el oxígeno. La disponibilidad de éste fue aprovechada por otras formas de vida diferentes de las plantas: por animales, por ejemplo. Estas nuevas formas de vida poseían la nada desdeñable ventaja con respecto a las anaeróbicas de que los procesos metabólicos basados en el oxígeno son mucho más eficientes que los anaeróbicos, lo que implica que la vida dependiente del oxígeno transcurre a un ritmo más elevado que la anaeróbica, una circunstancia esta que permite comprender la aparición de formas de vida más complejas.

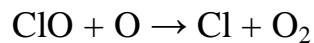
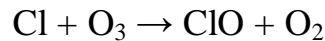
La fotosíntesis permite liberar el oxígeno y el carbono del CO₂. Y el oxígeno, en forma gaseosa, pasó a la atmósfera, mientras que el carbono sería una de las formas de alimentación de las plantas. La atmosfera actual tiene un 21 % de oxígeno, 78 % de nitrógeno y el resto de otros elementos, el argón entre ellos. La troposfera, la parte más cercana a la corteza y el lugar en que se producen la mayoría de los fenómenos atmosféricos, va desde la superficie terrestre hasta una altura que varía entre los 6 km en las zonas polares y los 18-20 km sobre el ecuador. Luego vienen la estratosfera (de 9-18 hasta 50 km), en la que se distingue la ozonfera (15-40 km); la mesosfera (50-80 km); la ionosfera, también conocida como «termosfera» (80-600 km) y la exosfera (600-2.000/10.000 km). En la troposfera, la temperatura disminuye conforme se asciende (a 18 km es de unos 60 °C bajo cero), mientras que en la estratosfera ocurre lo contrario, debido a que la radiación ultravioleta (una de las regiones del espectro solar, dotada de una energía que daña moléculas importantes en los seres vivos, como las del ADN) transforma el ozono en oxígeno, un proceso exotérmico que genera calor. La mesosfera contiene apenas el 1 % del

aire de la atmósfera y su temperatura es de unos 80 °C bajo cero, lo que la convierte en la región más fría de la atmósfera. De hecho, en la siguiente zona, la ionosfera, la temperatura vuelve a subir, aunque depende mucho de la radiación que le llega del Sol, es decir, si es de día o de noche (en periodos de gran actividad del Sol, la temperatura puede llegar a los 1.500 °C). En cuanto a la exosfera, es la región fronteriza con el espacio exterior, en la que se escapan moléculas que habían permanecido en la Tierra.

Un componente de la atmósfera terrestre es el ozono, una molécula formada por tres átomos de oxígeno (O_3) que desempeña un papel importante en la química de la atmósfera del planeta, a pesar de que constituye una parte muy pequeña de él (la mayor parte del ozono atmosférico se encuentra en una capa de alrededor de 20 km de espesor, situada a una altura de entre 25 y 30 km; se halla, por consiguiente, sobre todo, en la estratosfera). La importancia del ozono atmosférico se debe a que absorbe radiación ultravioleta procedente del Sol, una radiación que daña a las macromoléculas, como, por ejemplo, proteínas y ácidos nucleicos, que son esenciales para las células vivas. Los componentes principales de la atmósfera, como el oxígeno ordinario (O_2), absorben radiación ultravioleta (UV) de hasta 230 nanómetros (nm) de longitud de onda, con el resultado de que para estas frecuencias solamente en torno a una parte de 10^{16} de la intensidad de radiación solar llega a la superficie terrestre. Pero para longitudes de onda mayores de 230 nm sólo se dispone del ozono como pantalla protectora. Además, el ozono es muy eficiente: sus características químicas son tales que absorbe mucha energía, entre 230 y 290 nm, lo que compensa su pequeña concentración; por ejemplo, para una longitud de onda de 250 nm, solamente una parte de 10^{30} de la radiación solar incidente atraviesa la capa de ozono.

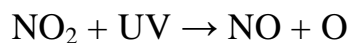
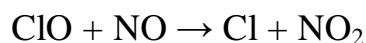
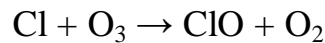
En 1974, los químicos Sherwood Rowland y Mario Molina anunciaron que una serie de gases, denominados «clorofluorocarbonos» (CFC), utilizados, por ejemplo, en los procesos de refrigeración y en los aerosoles, representaban un gran peligro para la capa de ozono, peligro que se confirmó en 1985 cuando se detectó sobre la Antártida una importante disminución de ozono (de alrededor del 30 %) durante la

larga noche polar. El proceso químico implicado es, básicamente, el siguiente. Uno de los CFC, el CClF_3 , por ejemplo, recibe radiación ultravioleta, descomponiéndose en CF_3 , por una parte, y Cl (cloro), por otra. Así, se libera cloro en la atmósfera. Y este cloro se combina con el ozono según varios ciclos. El más sencillo es el siguiente:

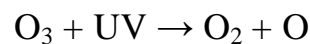


El saldo neto de estas dos reacciones es, por un lado, que el ozono se convierte en oxígeno normal ($\text{O}_3 + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$), y que el cloro continúa libre, con lo que puede reanudarse el ciclo, que destruye más ozono.

Otro ciclo es en el que interviene, como catalizador, un compuesto del nitrógeno, NO (óxido nítrico):



También aquí el saldo es poco favorable para el ozono:



esto es, el ozono se destruye, dando lugar al químicamente diferente O_2 , más átomos de oxígeno, y el cloro sigue libre.

En 1987 la ONU redactó el denominado Protocolo de Montreal, que reclamaba una reducción del 50 % en las emisiones de CFC para 1999. Posteriormente, en 1992 se acordó que el 1 de enero de 1996 entrase en vigor la prohibición de su producción. Las mediciones realizadas a comienzos del siglo XXI confirmaron que la concentración de CFC en la atmósfera había dejado de aumentar. Las previsiones

actuales son que se recuperarán los niveles de ozono de 1980 hacia 2070, ya que los gases CFC se mantienen en la atmósfera durante mucho tiempo.

§5. Atmósferas planetarias

En cuanto a las atmósferas de los demás planetas del Sistema Solar, para averiguar si existen o no, y su composición, se utilizan los datos de las radiaciones que emiten las correspondientes atmósferas, así como los procedentes de mediciones realizadas por sondas espaciales que pasan por las proximidades de los planetas en cuestión.

Mercurio no posee una atmósfera significativa, probablemente, debido al fuerte viento solar (corrientes de partículas cargadas procedentes del Sol) producido por su cercanía al Sol. Muy diferente es el caso de Venus, como demostraron especialmente las informaciones aportadas por las sondas Venera IV (soviética; 1967) y Magallanes (estadounidense), que orbitó Venus entre 1990 y 1994, sumergiéndose finalmente en la densa atmósfera venusiana. Así, sabemos que esa atmósfera está constituida sobre todo, en más del 96 %, por dióxido de carbono que se extiende hasta unos 45 km de altura; a partir de ese momento el cielo venusiano es limpio y de gran visibilidad, pero no por ello la situación es similar a la terrestre: la presión y la temperatura aumentan según se desciende hacia la superficie del planeta, y al llegar al suelo la presión corresponde a la que se observa en la Tierra a miles de metros por debajo del nivel del mar, y con unas temperaturas extremadamente altas. Ahora bien, el dióxido de carbono es, recordemos, el principal gas de efecto invernadero, de manera que Venus es un extraordinario ejemplo de este fenómeno. Diferentes mediciones han mostrado que la temperatura en la superficie venusiana alcanza los 470 °C.

El primer gran estudioso del efecto invernadero en Venus fue el astrofísico y gran divulgador científico Carl Sagan. Sus investigaciones y propuestas en este sentido las hizo cuando aún era un estudiante de doctorado, y las incluyó en su tesis (1960). Su idea de que la atmósfera de Venus producía un efecto invernadero se vio confirmada posteriormente por los resultados que transmitió la sonda Venera IV.

La atmósfera de Marte también contiene una alta proporción de dióxido de carbono, en torno al 95 % (un problema para posibles astronautas, ya que es muy tóxico para los humanos, no para las plantas), pero es muy tenue, con una presión de unas seis milésimas la de la terrestre, lo que evita que se dé el efecto invernadero. Debido a esa baja densidad atmosférica, los vientos que existen allí tienen escasa capacidad para desplazar calor, con la consecuencia de que hay grandes diferencias de temperaturas en su superficie, dependiendo de la zona (y la posición relativa con respecto a la radiación proveniente del Sol). Existen nubes, compuestas de agua y de dióxido de carbono.

En cuanto a Júpiter, su atmósfera —la mayor del Sistema Solar, dividida, como la terrestre, en varias capas: troposfera, estratosfera, termosfera y exosfera— está formada mayoritariamente por hidrógeno y helio, casi como si fuera una estrella, más gases como metano, amoníaco y nitrógeno, que producen una cierta variedad de nubes —en cualquier caso, hay que advertir que en los planetas «gaseosos» es difícil establecer dónde termina la superficie del planeta y dónde comienza la atmósfera—. Se dan también corrientes de viento, producidas por mecanismos similares a los de la Tierra, y asimismo por estructuras vorticiales (ciclones, anticiclones), y tormentas (con relámpagos incluidos). Los vórtices se manifiestan en forma de enormes manchas ovaladas de color rojo, blanco o marrón; las dos manchas de mayor tamaño son la Gran Mancha Roja y la Pequeña Mancha Roja.

De la atmósfera de Saturno diremos que está formada por un 96 % de hidrógeno, un 3 % de helio y cantidades mucho más pequeñas de otros gases, metano entre ellos. Debido a su rápida rotación (la segunda más elevada del Sistema Solar después de Júpiter) y al calor que emite el planeta, se producen vientos de muy altas velocidades (se han llegado a medir algunos de 1.800 km/h), dándose, al igual que en Júpiter, estructuras ciclónicas. El mayor de sus satélites, Titán, cuyo diámetro es de 5.150 km —no es pequeño, por consiguiente—, posee también una atmósfera interesante: en ella se ha detectado nitrógeno (que constituye el 90 % de toda la atmósfera), metano (algo menos del 10 %) y en cantidades pequeñas hidrógeno, etano y monóxido de carbono.

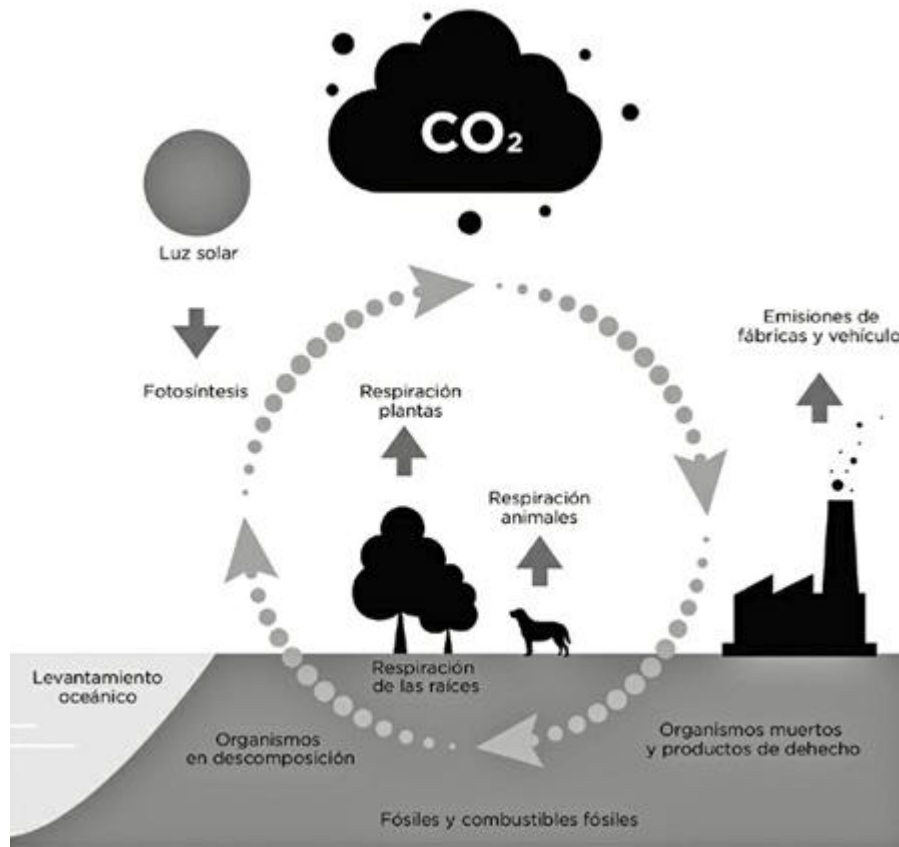
Finalmente, hay que hablar de Urano, cuya atmósfera, formada sobre todo por hidrógeno y metano, es bastante uniforme y presenta poca actividad, así como de Neptuno, donde abundan el agua, el amoníaco y el metano, que se condensan formando cristales o hielo, y que muestra una actividad relativamente discreta, con vientos de hasta 2.000 km/h y grandes manchas que duran bastante tiempo.

§6. La Tierra, hábitat de la vida

La Tierra es el hábitat de la vida; proporciona los elementos químicos y las moléculas necesarias para la vida de las especies (nutrientes), mediante el intercambio entre éstas y el ambiente, que incluye la biomasa, la atmósfera y la hidrosfera. Los seres vivos están compuestos por entre 31 y 40 elementos químicos, distintos en cada especie (en el caso de los humanos, los principales son hidrógeno, un 60 %; oxígeno, 25, 5 %; carbono, 10, 5 %; fósforo, nitrógeno, 2, 4 %; calcio, 0, 22 %; fosforo y azufre, ambos con un 0, 13 %), aunque la mayoría de ellos no son directamente asimilables, reciclándose constantemente en virtud de ciclos biológicos, geológicos y químicos. El agua, esencial para la vida tal como la conocemos (un 60 % del cuerpo humano es agua), se encuentra en uno de tres estados posibles: sólido, líquido o gaseoso. Su ciclo comienza con la evaporación del agua de los océanos, que, al ascender, se enfría; la condensación hace que vuelva a caer en forma líquida o en copos de nieve sobre mares y continentes. Una pequeña parte, aproximadamente un 2, 5 %, es agua dulce, que los seres vivos consumen en grandes proporciones y que sólo se repone a través del ciclo mencionado.

Los ciclos químico-biológicos desempeñan papeles fundamentales en el mantenimiento de la vida, animal y vegetal. Ya mencionamos el ciclo del carbono, que se realiza mediante dos procesos complementarios: la respiración toma el oxígeno y los carbohidratos y produce CO₂, agua y energía, en tanto que las plantas utilizan la energía del Sol para formar hidratos y oxígeno a partir del dióxido de carbono. Otro proceso biológico importante es la nitrificación, la oxidación biológica de amonio con oxígeno para formar nitritos, a la que sigue la oxidación

de éstos, que se convierten en nitratos, sales de ácido nítrico, NO_3H . Estudiada por el científico ruso Serguéi Nikoláievich Vinogradski (1856-1953), la nitrificación forma parte destacada del ciclo del nitrógeno, un conjunto de reacciones que permiten mantener el suministro de este componente a los seres vivos (ya mencionamos su presencia en los humanos) y a los suelos.



El ciclo del carbono sobre la Tierra

La agricultura, en efecto, depende mucho de la disponibilidad de nitrógeno en los suelos. El químico alemán Justus von Liebig hizo hincapié en este punto y señaló el entramado químico del que forma parte; así, en un libro que publicó en 1840, *Chemie in ihre Anwendung auf Agricultur und Physiologie (Química orgánica y sus aplicaciones a la agricultura y a la fisiología)*, explicaba:

No podemos suponer que una planta puede llegar a su madurez, incluso en el medio vegetal más rico, sin la presencia de materia que contenga

nitrógeno, ya que sabemos

que existe nitrógeno en todas las partes de la estructura vegetal. En consecuencia, la primera y más importante pregunta que hay que contestar es: ¿Cómo y en qué forma suministra la naturaleza nitrógeno al albumen vegetal, y gluten a frutas y semillas?

Esta pregunta es susceptible de una solución muy sencilla.

Como sabemos, las plantas crecen perfectamente en carbón vegetal puro si al mismo tiempo se las suministra agua de lluvia. El agua de lluvia contiene nitrógeno solamente de dos formas: bien como aire atmosférico disuelto, o como amoníaco, que consiste de ese elemento [nitrógeno] y de hidrógeno. Ahora bien, el nitrógeno del aire no se puede combinar con ningún elemento excepto con el oxígeno, incluso recurriendo a los medios químicos más poderosos. No tenemos ninguna razón para creer que el nitrógeno de la atmósfera tome parte en los procesos de asimilación de plantas y animales; por el contrario, sabemos que muchas plantas emiten el nitrógeno que absorben sus raíces, bien en forma gaseosa o disuelto en agua. Por otra parte, existen numerosas pruebas que muestran que la formación en plantas de sustancias que contienen nitrógeno, tales como el gluten, tiene lugar en proporción a la cantidad de este elemento que es transportado hacia sus raíces en forma de amoníaco, derivado de la putrefacción de materia animal.

Como vemos, la vida, de la que nos ocuparemos en los capítulos siguientes, está íntimamente relacionada con los procesos químicos que tienen lugar en la Tierra. Ahora bien, esa vida se desarrolla dentro de «nichos» particulares, denominados «ecosistemas». Un ecosistema es el conjunto de seres vivos de distintas especies (biocenosis) que comparten un espacio determinado por la orografía y composición del suelo, la abundancia o escasez de agua y de elementos adecuados para mantener la vida. Está, asimismo, el clima, que es la síntesis de las condiciones materiales del ambiente (biotopo). La interacción de los organismos con el ambiente, dentro de un

ecosistema, determinan las variedades de vida existentes.

Las diferentes partes de la Tierra —litosfera, hidrosfera y atmósfera— establecen diferentes tipos de ecosistemas y, por consiguiente, de formas de vida, ya que ésta viene determinada por los elementos inorgánicos y orgánicos disponibles. Se tienen, así, ecosistemas como desiertos, selvas, bosques, mares, ríos, lagos, al igual que la atmósfera que acoge a aves y pájaros.

Capítulo 18

La célula es la vida

Contenido:

§1. *Naturaleza de la vida*

§2. *La célula*

§3. *Bacterias y arqueas*

§4. *Virus*

§5. *El sistema nervioso*

§6. *La reproducción celular*

§1. Naturaleza de la vida

La vida es un fenómeno peculiar, que se da en al menos un lugar del Universo, la Tierra, y que no es fácil de definir. Una definición procedente de la biología molecular sostiene que es una propiedad de los «organismos que contienen información hereditaria reproducible codificada en moléculas de ácido nucleicos, y que metabolizan al controlar el ritmo de reacciones químicas utilizando catalizadores proteínicos conocidos como enzimas». Veamos otras formas, en principio más sencillas de definirla, pues eluden hacer hincapié en los ácidos nucleicos (tal vez, en algún lugar del Universo exista vida que no dependa de estas moléculas):

1. «los organismos vivos son aquellos que poseen la capacidad de reproducirse y metabolizar sustancias (alimentarse)»; y
2. una definición propuesta por Gerald Joyce (m. 1956), experto en los temas del origen de la vida, que la NASA adoptó, según la cual «la vida corresponde a un sistema químico autosostenible con capacidad para llevar a cabo una evolución darwiniana».

Pero esto es, claro, contemplar, entender la vida desde la perspectiva actual. Uno de los primeros grandes estudiosos de la vida fue Aristóteles, cuya fama como filósofo

—o acaso habría que hablar de la apropiación que de él han hecho los filósofos— ha ocultado su inmensa labor como biólogo- naturalista. Centrándose en lo que observaba directamente, no en interpretaciones como las que empleó en sus teorías sobre el movimiento o los cielos, dividió a los seres vivos en dos grupos, plantas y animales, distinguiendo en éstos a los que tenían sangre de los que no, más tarde diferenciados en vertebrados e invertebrados. Encontró cinco grupos entre los primeros —mamíferos, pájaros, reptiles y anfibios, peces y ballenas— y otros tantos entre los segundos —cefalópodos, crustáceos, insectos, moluscos y zoofitos (los que tienen forma de planta)—. En uno de sus libros, *De anima*, describió Aristóteles los organismos como el resultado de la unión de la materia y del ánimo, que diferenció en vegetativa, animal y racional: la vegetativa era la de las plantas; ésta y la animal, las de los seres de este tipo; y las dos anteriores, además de la racional, se encontraban presentes en los humanos. De este modo explicó la existencia de tres tipos de seres vivos: vegetales, animales y humanos, modelo que estuvo vigente hasta el descubrimiento de la materia animada, que constituía las células, los tejidos, los órganos y los sistemas.

La presencia de una elusiva ánima en la contextualización aristotélica ya sugiere la convicción de que la vida no se podía explicar únicamente en términos mecánicos; de hecho, durante mucho tiempo la creencia generalizada era que la vida aparecía de manera espontánea a partir de materia inanimada. Incluso Jean Baptiste van Helmont, con quien ya nos encontramos en el capítulo 7, y que se esforzó en intentar aplicar las leyes naturales para indagar en los fenómenos vitales, no dejó de apoyar la idea de la generación espontánea. Entre las numerosas contribuciones de Van Helmont se cuentan los experimentos que realizó sobre el crecimiento de las plantas, que le permitieron identificar el papel que en su alimentación desempeñan dos gases que ahora se conocen con el nombre de dióxido de carbono y nitrógeno. Dentro de este campo, otro de sus experimentos tuvo como protagonistas a los árboles, en concreto a un sauce llorón. Lo cultivó empleando una cantidad determinada de tierra y, a lo largo de los cinco años siguientes, fue añadiendo únicamente agua; encontró que, mientras la masa del árbol había aumentado en 75

kg, la de la tierra solo había disminuido en 500 g, y concluyó, erróneamente (el proceso de la fotosíntesis era por aquel entonces desconocido), que el incremento de masa se debía solo al agua que había absorbido el sauce, incluyendo la de la lluvia. El carácter «moderno» de tales investigaciones contrasta, por ejemplo, con otra de sus creencias: Van Helmont pensaba que si se colocaba ropa sucia —para él el sudor era uno de los principios activos en la generación de la vida— en un tonel en el que también hubiera algo de trigo, al cabo de 21 días aparecerían ratones, y no provenientes del exterior, sino «creados».

Mucho más sugerentes eran las observaciones diarias en las que se veía aparecer gusanos de la descomposición de materiales orgánicos, y moscas de trozos de carne expuestos al Sol. Hacia el final del siglo XVII, Francesco Redi (1626-1698) observó que, colocado en un frasco abierto, el pescado putrefacto generaba, al cabo de un tiempo, moscas, mientras que no ocurría lo mismo con un jarro idéntico, pero cerrado. De este experimento extrajo la consecuencia de que las moscas no surgían del pescado, sino de huevos. Sin embargo, la meticulosidad científica de Redi no fue lo suficientemente poderosa como para impedir el paso a especulaciones religiosas que utilizaron sus descubrimientos para señalar que, si bien era cierto que la vida no surgía espontáneamente, sino sólo a partir de vida preexistente, la cadena de progenitores biológicos que esta idea requería debía tener un punto de partida: en el comienzo Dios había creado todos los animales y plantas que existen.

En las décadas que siguieron al descubrimiento de Redi, la invención y utilización del microscopio sirvió para observar microorganismos de todo tipo; estas observaciones revivieron entre muchos la creencia en la generación espontánea de la vida. Fue Louis Pasteur quien demostró en 1862 que la vida sólo procede de la vida. Para llegar a esta conclusión se sirvió de experimentos no demasiado diferentes de los de Redi. En primer lugar, demostró que hay microorganismos que viven en el aire que nos rodea y que pueden contaminar incluso el cultivo más estéril. A continuación mostró que, si un caldo de cultivo estéril era introducido en un recipiente sellado al vacío, en el que no podía penetrar el aire, no surgía en él ningún microorganismo. «No, no hay ninguna circunstancia hoy conocida»,

manifestaba Pasteur en una conferencia que pronunció en la Sorbona en 1864, «en la que se pueda afirmar que seres microscópicos han venido al mundo sin gérmenes, sin padres semejantes a ellos. Los que lo pretenden han sido juguetes de ilusiones, de experiencias mal hechas, plagadas de errores que no han sabido percibir o que no han sabido evitar». La vida, por tanto, sólo procede de la vida.

Pero hubo de pasar mucho tiempo antes de que el estudio de la vida se plantease en términos semejantes. En la *Kritik der Urteilkraft* (*Crítica del juicio*; 1790), Kant negó la posibilidad de alcanzar un conocimiento de un ser vivo a partir de sus componentes y de explicar su actividad mediante leyes naturales: «Nunca habrá un Newton que explique una hoja de hierba», declaró.

El Romanticismo hizo cuanto pudo por ofrecer una explicación alternativa a la que otorgaba la ciencia experimental. Uno de sus postulados básicos era que el todo es distinto y mayor que la suma de las partes. Goethe lo expresó en *Fausto* (1808, 1832) de la siguiente manera:

*Quien estudia el alma con rígida persistencia
después ya puede considerar partes
y clasificar las partes que quedan en sus manos
pero, ¡ay!, el vínculo espiritual se pierde.*

En *Ideen zu einer Philosophie der Natur als Einleitung in das Studium dieser Wissenschaft* (*Ideas para una filosofía de la Naturaleza*; 1797), Friedrich Schelling invocaba el conocimiento intuitivo de la naturaleza: «un idealismo trascendental en el que la relación entre la conciencia y la naturaleza se establece a través de la intuición intelectual». Un año después, en *Von der Weltseele* (*Sobre el alma del mundo*), sustituyó la concepción de la naturaleza como un mecanismo por la de una totalidad, un organismo vivo, que no puede explicarse como la suma de las partes, que «sólo son reales en los seres organizados».

Lorenz Oken (1779-1851), figura destacada de la *Naturphilosophie*, orientó la investigación del colectivo a la búsqueda del arquetipo, la forma ideal que personificaba el plan de la naturaleza. Postuló la existencia de una materia

primitiva e indiferenciada (*Urshleim*) que, a través de la formación de vesículas esféricas, daba origen a los infusorios, protozoos considerados como la forma más simple de vida.

Diferente, pero todavía alejado de la explicación que la ciencia decimonónica impondría en el estudio de la vida, es el denominado «vitalismo». En la segunda mitad del siglo XVIII, Paul-Joseph Barthez, un médico de la Escuela de Montpellier, que contribuyó a la *Encyclopédie*, describió la existencia de una fuerza vital inconsciente que actuaba a nivel molecular, cuando esta expresión no contaba con una definición precisa, y ofreció una definición tautológica: «Llamo fuerza vital del hombre a la causa que produce todos los fenómenos de la vida en el cuerpo del hombre». En su *Theoria Generationis* (1759), Caspar Friedrich Wolff se refirió a una imprecisa *vis essentialis* para explicar la generación y el crecimiento, mientras que F. Blumenthal introdujo la *vis vitalis*.

Johannes Müller, que sintetizó los conocimientos de fisiología humana en los dos volúmenes de *Handbuch der Physiologie des Menschen* (1834, 1840), actualizando la doctrina aristotélica de las causas, mecánica, química y orgánica, utilizó también la acción de una fuerza integradora, el principio vital (*Lebensprinzip*) o plan de la vida. Discípulos suyos —que ya han aparecido, al igual que su maestro, a lo largo de estas páginas—, como Hermann von Helmholtz o Emil du Bois-Reymond, superaron este planteamiento, defendiendo una medicina científica en la que la fisiología era entendida como el estudio de los procesos orgánicos, recurriendo a la física y la química, además de, por supuesto, a la biología. La defensa más prominente de este planteamiento se encuentra en un libro, al que volveremos en el capítulo 21, del fisiólogo francés Claude Bernard, *Introduction á l'étude de la médecine expérimentale* (*Introducción al estudio de la medicina experimental*; 1865), que consideraba que, cuando un científico calificaba un fenómeno como vital, reconocía su incapacidad para ofrecer una explicación científica. Aun así, en *L'évolution créatrice* (*La evolución creadora*; 1907) Henri Bergson introdujo *l'elan vital* para escapar al mecanicismo cada vez más influido por el azar y el finalismo, y reivindicó la capacidad de la intuición para la comprensión de la vida.

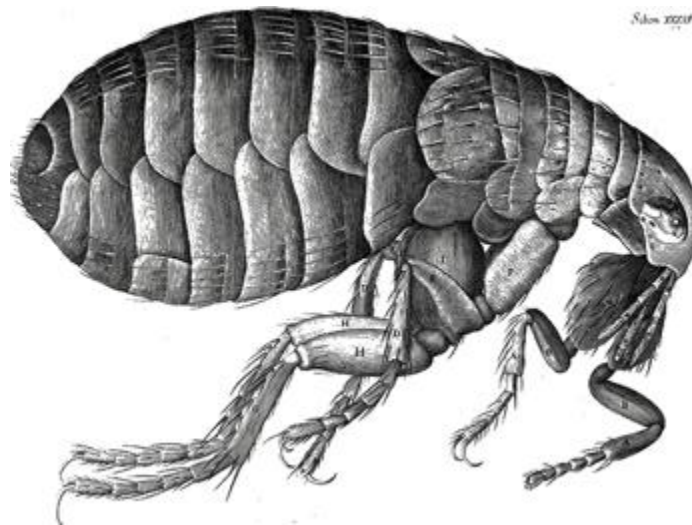
El debate se reactivó con la escuela psicológica de la *Gestalt*, que mantenía que la percepción era del todo, no la construcción mental de las sensaciones.

§2. La célula

El conocimiento detallado de los seres vivos se había iniciado con la construcción del microscopio, instrumento al que ya nos referimos en el capítulo 3. No sorprendentemente, el primer científico conocido que realizó observaciones biológicas con un microscopio fue Galileo, que contempló a través de él algunos insectos. Pero Galileo apenas continuó por esta senda, algo que sí hizo Marcello Malpighi (1628-1694), catedrático de la Universidad de Bolonia considerado como el fundador de la investigación textural con el microscopio. Entre sus aportaciones (utilizando la luz del Sol para iluminar la muestra) sobresale una que llevó a cabo al observar un fino corte del tejido pulmonar de una rana, encontrando que había sangre en el interior de unos delgados tubos (presentó este resultado en un libro que publicó en 1661, *De pulmonis*); había descubierto los capilares y comprobado la exactitud de la hipótesis de William Harvey acerca de la existencia de una comunicación entre el sistema arterial y el venoso, al tiempo que completaba el diseño del circuito sanguíneo. Describió con detalle la preparación de las muestras para su observación: las inyecciones de mercurio y de cera, los métodos para teñir con tinta y otros líquidos, así como los medios de iluminarlas. Fue el primer observador sistemático de la naturaleza: analizó el desarrollo de los pollos desde el huevo, introdujo la anatomía comparada y fue el primero en estudiar los tejidos.

Aunque sus contribuciones al campo que ahora estamos considerando no fueron demasiado importantes, un nombre particularmente distinguido en la difusión del uso del microscopio es el de uno de los grandes protagonistas de la Revolución Científica, Robert Hooke (1635-1793), que mejoró dicho instrumento con la luz de una llama frente a una lente amplificadora en cuyo foco se situaba la preparación. En 1665 publicó un libro que se convirtió en un clásico de la microscopía: *Micrographia (Micrografía)*, significativamente subtulado *O algunas descripciones fisiológicas de los cuerpos diminutos realizadas mediante cristales*

de aumento con observaciones y disquisiciones sobre ellas. Aunque sus elaboradas imágenes (cada una acompañada de comentarios) no respondían a un programa específico, sabía muy bien que estaba penetrando en un territorio inexplorado que guardaba todo tipo de sorpresas. «No parece improbable», manifestaba en el «Prefacio», «que mediante la ayuda de estos medios llegue a descubrirse más plenamente la sutil composición de los cuerpos, la estructura de sus partes, las varias texturas de su materia, los instrumentos y modos de sus movimientos internos y todas las demás posibles constituciones de las cosas, todo lo cual los antiguos peripatéticos se conformaban con abordar mediante dos palabras generales e inútiles (si no se explican más), como son materia y forma».



«Pulga». Ilustración de la *Micrographia*, de Robert Hooke (1665)

En la *Micrografía* aparecen estudios micrográficos muy variados; por ejemplo, la punta de una «agujita aguda», el filo de una navaja, el «tafetán o seda en relieve», «figuras de seis brazos formadas en la superficie de la orina por congelación», el moho azul, el musgo, el aguijón de una abeja, las plumas del pavo real, las patas, alas y ojos de las moscas, la tarántula, la hormiga, la pulga (que incluía la más celebrada de sus ilustraciones) o su «Observación XVIII»: «La estructura o textura del corcho y de las celdas [ce//s] y poros de algunos otros cuerpos esponjosos

semejantes». Es interesante e importante citar algo de lo que escribió allí:

Cogí un trozo bien claro de corcho y con un cortaplumas tan afilado como una navaja de afeitar, corté un trozo, dejando su superficie extraordinariamente lisa. Al examinarlo luego con mucha diligencia con un microscopio pensé que podía ver cómo aparecía un poco poroso, pero no era capaz de distinguir los poros con la suficiente claridad como para estar seguro de que lo eran, y mucho menos para estar seguro de cuál era su forma.

Sin embargo, juzgando por la ligereza y blandura del corcho que sin duda su textura no podía ser tan delicada que, de recurrir a una mayor diligencia, no pudiera quizá hallar el modo de discernirla con un microscopio, con el mismo cortaplumas afilado separé de la anterior superficie lisa un trozo extraordinariamente delgado y, colocándolo en un portaobjetos negro, dado que se trataba de un cuerpo blanco, y proyectando sobre él la luz con una gruesa lente plano-convexa, pude percibir con enorme claridad que estaba todo perforado y poroso, muy a la manera de un panal, aunque sus poros no eran regulares, si bien no difería de un panal [...].

Tan pronto como los vi (siendo, ciertamente, los primeros poros microscópicos que yo hubiera visto nunca, y tal vez que hubieran sido vistos jamás, pues nunca encontré ningún escritor ni persona alguna que hubiese hecho mención de ellos antes de ésta), consideré que con su descubrimiento me había sugerido a mí mismo la verdadera e inteligible razón de todos los fenómenos de corcho.

Y un poco más adelante, añadía: «Y si pudiésemos descubrir la estructura y textura de estas membranas y de otros diversos cuerpos con tanta facilidad y certeza como las del corcho, no parece haber razón probable en contra de que pudiésemos dar con la razón probable de todos sus fenómenos». Fiel a la idea de que era necesario descubrir observando más que pensando o imaginando, Hooke señalaba que «hasta tanto nuestro microscopio o algún otro medio nos permita descubrir la verdadera

estructura y textura de todos los tipos de cuerpos, hemos de andar a tientas en la oscuridad, conjeturando tan sólo las verdaderas razones de las cosas mediante símiles y comparaciones». Al decir esto, estaba anunciando un programa que conduciría, en el siglo XIX, cuando se dispuso de mejores microscopios, a la identificación definitiva de la estructura celular en los seres vivos (animales o vegetales). De hecho, Hooke utilizó el microscopio compuesto. El primero estaba formado por una lente convergente de foco corto, con la cual se observaban objetos situados entre la lente y su foco principal, mientras que el segundo estaba integrado por dos vidrios lenticulares convergentes fijos en un mismo tubo, de manera que coincidiesen sus ejes, uno de foco corto, llamado «objetivo», porque daba frente al objeto, y el otro, menos convergente, denominado «ocular», porque se encontraba cerca del ojo del observador.

Tres lustros después de la publicación del texto de Hooke, esto es, en 1680, el médico y botánico británico Nehemiah Grew publicó un libro, *Anatomy of Plants (Anatomía de las plantas)*, en el que también se recurría a las *cells*: «el microscopio demuestra que estos poros son todos, de alguna manera, esféricos en la mayoría de las plantas; y esta parte, una masa infinita de pequeñas Celdas [*Cells*] o Vejigas [*Bladders*]».

Obsérvese que hemos traducido la voz inglesa *cell* por «celda» y no por «célula», el término que representa la idea de Hooke y Grew. Esto se debe a que en castellano la voz «célula», que existía, aún no se había utilizado en este sentido, esto es, en el dominio científico. Si se consulta el tomo II (que contenía únicamente las palabras que comenzaban por la letra c) del *Diccionario de la lengua española* de la Real Academia Española, más conocido como *Diccionario de autoridades*, publicado en 1729, nos encontramos con la siguiente definición: «CÉLULA: diminutivo de Celda, cualquier pequeño seno o mansión corta en que se recoge, guarda, o esconde alguna cosa. Viene del latín *Cellula*, que significa lo mismo. Es voz anticuada». Mientras que en castellano, estas «celdas» pasarían a ser denominadas «células», en inglés no hubo problema: *cell* continuó utilizándose. (La primera vez que se registra en el diccionario de la Real Academia Española la acepción de *célula*

referida a la biología es en 1884, en la 12.^a edición; apareció como segunda acepción, con las marcas de botánica y zoología. Se definía de la manera siguiente: (Del lat. *cellula*, d. de *cella*, hueco). f. Pequeña celda, cavidad ó seno. || *Bot. y Zool.* Elemento anatómico microscópico de los vegetales y animales, y de figura ordinariamente esferoidal». Curiosamente, en el diccionario académico el adjetivo «celular» sí se recoge con una acepción de anatomía y botánica antes que la que se registra del sustantivo «célula». Ya se consigna en el *Suplemento* de la octava edición, en 1837: «adj. *Anat. y Bot.* Lo que tiene celdillas por donde pasan los jugos nutricios»).

Junto a Hooke, e independiente de él, el otro gran protagonista de los primeros momentos de la historia del microscopio fue un holandés, Antony van Leeuwenhoek (1632-1723). Comerciante de profesión, afincado en Delft, sin apenas educación científica, Leeuwenhoek se dedicó a construir microscopios durante cerca de medio siglo. Con una sola lente biconvexa, cuidadosamente tallada, y un montaje con dos tornillos que permitía colocar el espécimen en el eje del cristal, consiguió imágenes más luminosas y nítidas (llegó a alcanzar los 200 aumentos). Suyas fueron las primeras imágenes de microorganismos (en una comunicación que dirigió en 1677 a la Royal Society londinense mencionó los espermatozoides, que observó en el esperma y que denominaba «animáculos»). Entre sus descubrimientos se hallan la identificación de las bacterias, que observó en 1683 en sus propios esputos y en su sarro dental, la forma y tamaño de los hematíes o glóbulos rojos de la sangre, y la textura de la pared de los vasos sanguíneos, del corazón, de los músculos, de la sustancia blanca del encéfalo y de la médula espinal. La finura de sus cortes era tal que, al someter uno de ellos al microscopio electrónico, se vieron con toda claridad las paredes de esas unidades morfológicas y funcionales llamadas «células».

Leeuwenhoek no tuvo discípulos ni descubrió sus procedimientos, y la observación microscópica no encontró un instrumento adecuado hasta la aparición, en la década de 1820, de los microscopios acromáticos, que eliminaron la aberración esférica y los halos. Hasta entonces, el conocimiento de la estructura de la célula apenas

progresó.

El avance en el conocimiento de la estructura de la materia biológica fue acompañado del desarrollo de la anatomía de los seres vivos. Después de realizar más de 600 autopsias en un año, Xavier Bichat señaló la existencia de estructuras compuestas de células que describió en un *Traité des membranes (Tratado de las membranas; 1800)*, de las que identificó 21 distintas, si bien este término de «membranas» sería sustituido en 1831 por el de «tejidos». De esta manera inauguró una nueva especialidad, la histología. Los tejidos, vegetales y animales, son estructuras celulares, no siempre idénticas, que realizan una determinada función. En el cuerpo humano se distinguen cuatro tejidos fundamentales: epitelial, conectivo, muscular y nervioso. La asociación funcional de dos o más tejidos explicó la existencia y actividad de los órganos, de los que se distinguen tres en las plantas (raíz, tronco y hoja) y hasta 15 en los humanos, entre ellos, el corazón, los pulmones, los ojos, el páncreas o la piel, cada uno compuesto por un tejido principal, el miocardio en el caso del corazón, y otros esporádicos. Un nivel superior es el de los sistemas orgánicos, de los que hay tres primarios; en las plantas, raíz, tallo y hojas, y 10 en los animales: esquelético, muscular, nervioso, digestivo, reproductor, etc. Los organismos tomaron su nombre del griego, aunque se documenta en 1701 su aparición en inglés, idioma del que proceden sus denominaciones en las lenguas romances. Entre las funciones superiores figuran la fotosíntesis de las plantas con clorofila, la reproducción sexual o la homeostasis (capacidad de mantener una condición interna estable compensando los cambios en su entorno mediante el intercambio regulado de materia y energía con el exterior, lo que se denomina «metabolismo») de los animales de sangre caliente. El instinto animal y la consciencia de la especie humana caracterizan a las formas de vida más complejas.

Asimismo, la observación microscópica de las células dio lugar a una especialidad, la citología, que acabó con la idea de la homogeneidad celular. Robert Brown descubrió en 1832 la presencia de una «aureola circular» en todos los tejidos, que identificó como el núcleo de la célula, en tanto el resto del material quedó sin

estudiar. En 1845 el botánico Hugo von Mohl lo denominó «protoplasma», describió tanto la membrana celular, en el sentido moderno de tejido que separa a una célula de las demás, como las que rodeaban y separaban al núcleo y a los orgánulos del protoplasma.

La investigación de las membranas utilizó los resultados experimentales de una línea de investigación anterior: la mezcla del aceite con el agua. Al verter unas gotas de aceite sobre una superficie de agua, Benjamin Franklin había descubierto que se formaba una fina capa de aceite sobre el agua, algo que por entonces se limitaba a una simple curiosidad. Un siglo después, lord Rayleigh calculó la relación entre el volumen de aceite, la superficie cubierta y el espesor de la capa formada, y Agnes Pockel (1862-1935), un ama de casa alemana, descubrió un algoritmo que aún se usa para calcular estas magnitudes. Con semejante base, Heinrich Quincke (1842-1922) encontró que una fina película de aceite actuaba como una membrana semipermeable, y en la década de 1890, mientras buscaba en Zúrich un medio para que la célula vegetal absorbiese las sustancias de su contorno, Ernest Overton descubrió accidentalmente que las moléculas de las sustancias no polares (aquellas que, cuando se forman en un enlace covalente entre átomos iguales, son neutras; esto es, tienen cargas eléctricas cero, los casos, por ejemplo, del H₂ y del O₂) atravesaban fácilmente las membranas, lo que le permitió formular una teoría de la estructura y función de la membrana.

La primera teoría celular fue obra de dos alemanes, un botánico, Matthias Jakob Schleiden (1804-1881), y un fisiólogo, Theodor Schwann (1810-1882), que coincidieron al explicar la composición de las plantas y los animales como la acumulación de las células. En un artículo («Beitrage zur Phytogenesis», esto es, «Contribución a la filogenia») que publicó en 1838 en el *Archiv für Anatomie, Physiologie und wissenschaftliche Medicin*, Schleiden describió la estructura celular de las plantas como si las células estuvieran asociadas para constituir los distintos órganos, en virtud de un proceso semejante a la cristalización. Consideraba el núcleo, al que denominó «citoblasto», como el órgano fundamental de la planta y explicó la formación y diferenciación de las células mediante la

secuencia «núcleo núcleo membrana celular». Por su parte, Schwann extendió a los animales la concepción celular, construyendo una teoría del carácter celular de la materia viva: «Hay un principio universal», manifestó, «para el desarrollo de las partes elementales de los organismos, aun los diferentes. Este principio es la formación de células». La generalización de la célula como constituyente último de los organismos condujo a la unificación de los principios anatómicos y fisiológicos de los seres vivos. La unidad de los fundamentos anatómicos y fisiológicos en las plantas y los animales llevó a la observación del origen y desarrollo del embrión. Mediado el siglo XIX, los constituyentes fundamentales de la célula se limitaban a la pared o membrana exterior, que contenía una sustancia viscosa (protoplasma), y el núcleo. La especialización de las células de acuerdo con la función de los tejidos dio lugar a diferencias morfológicas; así, las células del tejido muscular se contraen y dilatan, y su forma es estirada y fibrosa, mientras que los glóbulos rojos carecen de núcleo para optimizar el transporte de oxígeno.

Fue Rudolf Virchow (1821-1902), el primer catedrático de Anatomía Patológica en Alemania, quien renovó la teoría de la célula, hasta tal punto que es considerado el auténtico padre de la teoría celular. Presentó de manera completa sus ideas y resultados en un libro publicado en 1858: *Die Cellular- Pathologie in ihrer begründung auf physiologische und pathologische gewebelehre (La patología celular basada en la histología fisiológica y patológica)*. Nadie antes que Virchow había defendido con tanta fuerza, y apoyándose en todo tipo de hechos, el papel central de la unidad celular en la vida. Allí escribió:

Al igual que un árbol constituye una masa dispuesta de una manera definida, en la que, en todas sus distintas partes, en las hojas al igual que en las raíces, en el tronco al igual que en los brotes, se descubre que las células son los elementos últimos, así ocurre con todas las formas de vida animal. Todo animal se presenta como una suma de unidades vitales, cada una de ellas manifestando todas las características de la vida. Las características y unidad de la vida no se pueden limitar a ningún lugar particular de un organismo altamente organizado (por ejemplo, el cerebro del hombre), sino

que se encuentran solamente en la definida, constantemente recurrente estructura, que todo elemento individual manifiesta.

Su teoría celular se puede resumir en cinco puntos:

1. Todos los organismos están formados por una o varias células.
2. Las células son la unidad fundamental de la vida.
3. Todas las células proceden de otra célula (*omnis cellula a cellula*).
4. La célula es la unidad estructural, morfológica y fisiológica, de los seres vivos.
5. Las células tienen una doble acción como entidades independientes y como elementos constructivos de los organismos.

Pero las células poseen una estructura propia que les permite diferenciarse del medio exterior. La primera mención a una división de las células en dos grupos, procariotas (células sin núcleo) y eucariotas (células con núcleo), se encuentra en un artículo que el naturalista, zoólogo y biólogo marino francés Édouard Chatton (1843-1947) publicó en 1925, «*Pansporella perplexa*. Reflexiones sobre la biología y filogenia de los protozoos», aunque allí se limitaba a mostrar la composición de cada una de ellas al pie de sendas ilustraciones, siendo uno de sus estudiantes, André Lwoff, quien a partir de 1950 insistió en tal diferenciación. Las procariotas, grupo integrado en su mayor parte por las bacterias, surgieron hace 4.500 M. a. con el nacimiento de la vida, como organismos unicelulares y con una estructura elemental, mientras que las eucariotas, con 500 M. a. de antigüedad, representan un salto en la evolución de la vida que dio origen a los organismos multicelulares. Las procariotas son las células más simples y se componen de tres partes: los flagelos exteriores que determinan sus movimientos, la pared celular, que envuelve una membrana, y el citoplasma, con un núcleo sin membrana. Por su parte, las eucariotas se caracterizan por la diversidad de membranas que rodean los orgánulos. Ambas se dan en los cinco reinos en los que se estructura la vida:

Monera, Protista, Plantae, Fungi y Animalia.

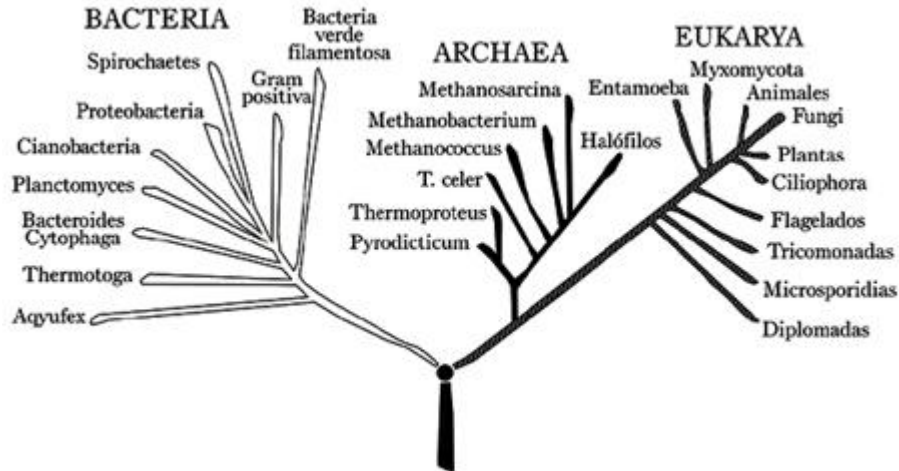
Señalemos, por último, que los organismos se distinguen por la forma en que construyen las moléculas de sus células. Los autótrofos, como los vegetales, sintetizan sus alimentos, mientras que los heterótrofos los toman del exterior.

§3. Bacterias y arqueas

Las bacterias, microorganismos unicelulares, constituyen un tipo de célula procariota que tomó una identidad propia hace entre 3.200 y 2.500 M. a. Se encuentran en todos los medios, incluso en los más inhóspitos: en un gramo de tierra se estima su número en torno a los 40 millones y no bajan de 100.000 en un mililitro de agua del mar. El nombre —*bacterium*, que deriva del griego, donde significaba «bastón pequeño», fue sustituido una década después por el plural, *bacteria*— lo introdujo en 1828 Christian Ehrenberg.

Pueden ser independientes o alojarse en un organismo, y, en este caso, ser necesarias para la vida, al contribuir a la digestión, o actuar como agentes patógenos. El ciclo del carbono y el del nitrógeno requieren la acción de ciertas bacterias. Para su estudio fue importante el filtro que desarrolló en 1883 el microbiólogo francés Charles Chamberland, que retenía las bacterias.

Otro tipo de célula eucariota son las arqueas, que en el pasado recibieron el nombre de «arqueobacterias». En realidad, las arqueas son bastante parecidas, en forma y tamaño, a las bacterias, pero las sendas por las que transcurrió su evolución fueron diferentes, de manera que en la actualidad el «árbol celular primigenio de la vida» se organiza en tres ramas, *Archaea*, *Bacteria* y *Eukarya*, que se originaron a partir de un organismo ancestral, LUCA (de sus siglas inglesas, Last Universal Common Ancestor). Ejemplos de arqueas son extremófilos que viven en ambientes hostiles como, por ejemplo, medios de alta acidez, de elevada alcalinidad, fosas abisales o glaciares, aunque también existen, y son muy abundantes, en los océanos, formando parte del plancton.



Árbol de la vida

§4. Virus

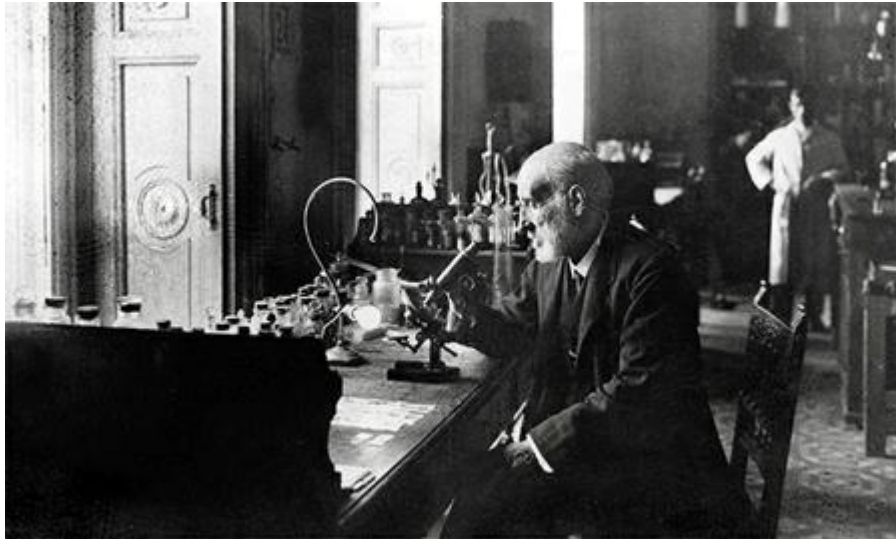
De especial interés son los virus, agentes microscópicos acelulares, esto es, no formados por células, pero que sólo pueden multiplicarse dentro de células, a las que infectan. El primer virus descubierto fue el del mosaico del tabaco, que infecta no sólo a ésta, sino también a otras plantas. Lo aisló en 1892 Dimitri Ivanowsky, mientras que fue Wendel Meredith Stanley quien descubrió su composición, investigación por la que recibió el Premio Nobel de Química en 1946. Se reproducen rápidamente debido al pequeño número de sus genes, lo que explica la rápida extensión de las epidemias. Fuera de la célula el virus es inerte y no hay rastro de metabolismo. Una partícula del virus (virión) está formada por un ácido nucleico rodeado por una corteza de proteína (cápsida). Bajo el nombre común de «virus» quedan englobadas más de 2.000 especies distintas, de origen desconocido, que comparten la propiedad común de reproducirse como huéspedes de una célula. En 1899, el microbiólogo danés Martinus Beijerinck observó que la multiplicación de los virus requería la división de las células. Las dimensiones mínimas de las bacterias y los virus contribuyeron a la conversión del contagio en epidemias de gran mortalidad.

§5. El sistema nervioso

Una estructura cuyas células poseen una organización especial es el tejido nervioso. Debido a su poca consistencia y fragilidad, el sistema nervioso es difícil de manipular y propenso al deterioro. Su particular complejidad retrasó el conocimiento de su configuración. Como en otros casos, hay una serie de pioneros que ofrecieron las primeras imágenes sin encontrar ninguna explicación funcional para los elementos propios de este sistema: las células nerviosas (neuronas), su prolongación (axón) y ramificaciones (dendritas), que parecen ramas que surgen del cuerpo principal de la célula. Hacia 1860, Otto Friedrich Karl Deiter estudió varios tejidos nerviosos utilizando procedimientos de tinción y técnicas de microdissección. Logró observar neuronas aisladas, identificando los axones, que llamó «ejes cilíndrico», y las dendritas, a las que se refirió como «procesos protoplásmicos» que formaban una red continua. Influido por el libro póstumo que Deiter publicó en 1865, *Untersuchungen über Gehirn und Rückenmark des Menschen und der Säugethiere (Estudios del cerebro y la médula espinal de los seres humanos y los mamíferos)*, y por el descubrimiento de los impulsos nerviosos, el histólogo alemán Joseph von Gerlach introdujo en 1872 la imagen de una red (protoplasmática) como elemento esencial de la materia gris que proporcionaba un medio funcional de comunicación, un protoplasma continuo del cual procedían las fibras nerviosas (1872). Un año después, Camillo Golgi (1843-1926) descubrió la reacción negra, que teñía de este color unas pocas células nerviosas, resaltándolas de las demás, lo que permitía observar mejor su estructura. Con este procedimiento, Golgi pudo demostrar que las dendritas no se fundían en una red, descubriendo además que el axón era un elemento presente en todas las células nerviosas. Sin embargo, no consiguió desentrañar la retícula de Gerlach, y continuó defendiendo, por consiguiente, una estructura continua para el sistema nervioso.

A esta teoría se opuso Santiago Ramón y Cajal (1852-1934), que sí fue capaz de desentrañar la retícula de Gerlach. Lo hizo, especialmente en trabajos realizados en 1888, perfeccionando el procedimiento de tinción de Golgi y recurriendo a tejidos jóvenes para apreciar mejor la línea de las terminaciones nerviosas, de las dendritas

a los axones (ley de la polarización dinámica).



Santiago Ramón y Cajal

Asimismo, descubrió que la independencia de la comunicación eléctrica de los impulsos entre neuronas se mantenía a pesar de la discontinuidad. Presentó las observaciones que sostenían sus ideas en un congreso de la Sociedad Anatómica Alemana, celebrado en Berlín en octubre de 1889. Allí, frente a científicos de la talla y prestigio de Albert Kolliker — en quien encontró un gran defensor—, Gustav Retzius, Wilhelm His, Wilhelm Waldeyer, Gustav Schwalbe y Karl Bardeleben, logró ser escuchado.

Básicamente, la doctrina neuronal se basa en cuatro principios:

1. La neurona es la unidad estructural y funcional del sistema nervioso.
2. Las neuronas son células individuales, no se continúan en otras neuronas, ni anatómica ni genéticamente.
3. La neurona tiene tres partes: el cuerpo de la célula (soma), que contiene el núcleo, dendritas, y axones.
4. Los impulsos eléctricos van primero de las dendritas al soma, y de éste a los axones, desde donde se encaminan a otras neuronas. Algunas veces las longitudes implicadas son considerables: en las neuronas que componen los nervios que van

desde la medula espinal hasta los pies, los axones pueden medir hasta casi un metro.

La prueba definitiva de la estructura discreta del sistema nervioso llegó con la invención del microscopio electrónico (1931).

§6. La reproducción celular

Aristóteles clasificó a los animales de acuerdo con las diversas formas en que se reproducían. Los gusanos eran los animales inferiores y lo hacían por generación espontánea en un medio húmedo. El nivel más bajo de reproducción sexual lo ocupaban los animales ovíparos, que procedían de un huevo puesto por la hembra en el caso de los pájaros y los reptiles. El nivel superior era el de los vivíparos, que nacían de un huevo fecundado que permanecía en su interior hasta el momento del nacimiento. La fecundación era el resultado del contacto sexual de la pareja, en el que el semen aportaba la forma a la materia del óvulo. Sin posibilidad de contemplar lo que sucedía a partir de la fecundación, la observación de diferentes huevos en distintas fases de su desarrollo le llevó a la identificación del embrión, que en el caso de los humanos situaba en las ocho primeras semanas después de la fecundación. Frente a la posibilidad de que la «producción» de un nuevo ser procediese de la presencia de un individuo minúsculo pero completo, preformación (si tal «miniser», el embrión, procedía del semen o del ovario es algo sobre lo que no se pronunciaba, señalando simplemente que se limitaba a crecer), la aparición sucesiva de los órganos, visible en las distintas observaciones, indujo al estagirita a inclinarse por la epigénesis, la idea de que un embrión se desarrolla a partir de un huevo/cigoto que no se ha diferenciado. Un mileniodespués, William Harvey describió en *De generatione animalium* (1651) los resultados de la disección del útero después de la fecundación, sin apreciar ningún cambio hasta pasadas 6 o 7 semanas. Descubrió que los efectos de la fecundación no se manifestaban hasta después de esas primeras semanas, lo que le llevó a aceptar la epigénesis. La división de una célula sexual femenina no fecundada producía una multitud de células iguales.

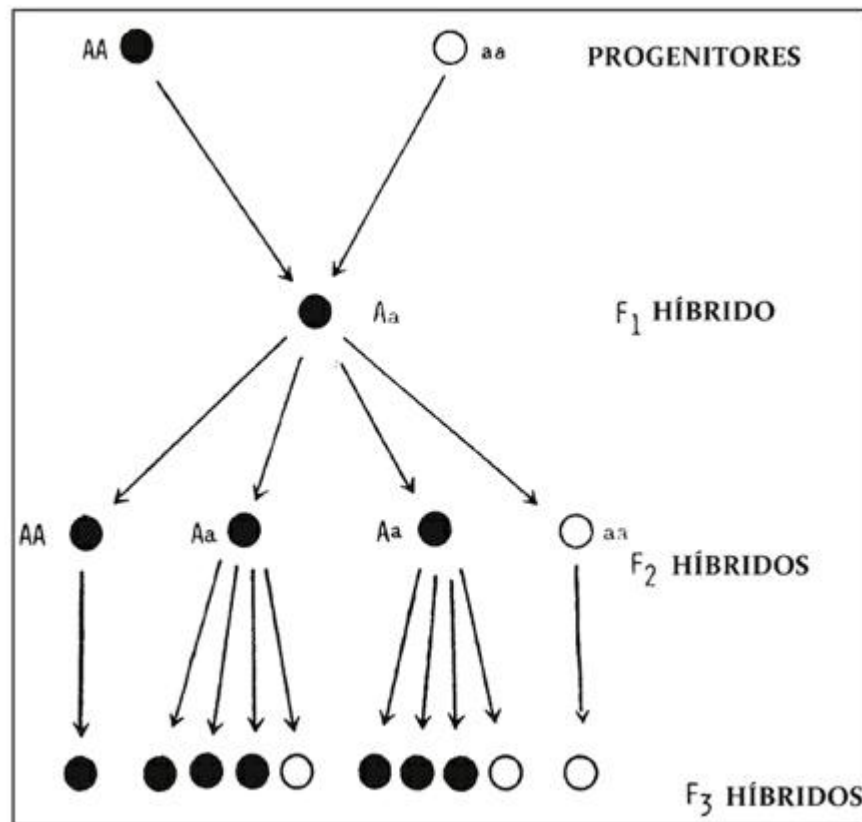
Otra variedad de reproducción es la partenogénesis —nombre que introdujo Richard Owen en 1849—, un tipo de reproducción basado en el desarrollo de células sexuales femeninas no fecundadas, modo que se puede dar en platelmintos, rotíferos, tardígrados, crustáceos, insectos, anfibios y reptiles, menos en peces y excepcionalmente en aves.

Pero el verdadero mecanismo de la reproducción, de la herencia, permaneció en la oscuridad hasta los trabajos del monje agustino Gregor Mendel (1822-1884), quien a través de una serie de experimentos sobre la hibridación de plantas mostró cómo se podían transmitir los caracteres hereditarios de generación en generación. En un artículo publicado en 1866 (aunque apareció en el tomo correspondiente a 1865) en los *Verhandlungen des naturforschenden Vereines* de Brno (hoy República Checa) y titulado «Experimentos sobre la hibridación de plantas», Mendel explicó los experimentos que realizó con plantas de guisantes en el jardín de su monasterio, en la citada Brno. Lo que hizo fue practicar la polinización artificial en más de 28.000 ocasiones con plantas de guisante, especie que eligió porque sus flores tienen el aparato reproductor masculino y femenino (hermafroditas), lo que permite la autofecundación, y por la variedad de sus caracteres: semillas (grises y lisas, o blancas y rugosas); cotiledones (amarillos o verdes); flores (blancas o violetas); vainas (llenas o rugosas; de color amarillo o verde) y tallo (altos y bajos, con flores axiales y en el extremo).

Como señaló en su artículo, los caracteres que tomó en cuenta se referían a las diferencias en:

1. la forma de las semillas;
2. el color del tejido de reserva de los cotiledones;
3. el color del tegumento seminal;
4. la forma de la vaina madura;
5. el color de las vainas no maduras;
6. la posición de las flores, y
7. la longitud de los tallos principales. Además, a estas siete características añadió la rapidez del crecimiento (un año) y la facilidad de los cruces y la

reproducción por autofertilización por cruzamiento.



Explicación de los experimentos de Mendel con guisantes

Durante cerca de ocho años, Mendel estudió 34 variedades de tres especies, que diferían en las citadas siete características. En la primera experiencia cruzó una variedad de semillas lisas con otra de semillas arrugadas, y al revés. En lugar de semillas más parecidas encontró que todas las nuevas eran redondas, y dio al conjunto el nombre F₁. Las sembró, dejó que se autofecundasen y obtuvo semillas de la generación F₂ en proporción de tres lisas por una rugosa. Sembró unas de cada clase y obtuvo la generación F₃. Las semillas arrugadas produjeron otras del mismo carácter, mientras que las lisas lo hacían en la proporción de tres lisas por una arrugada. Llamó «dominante» al carácter que se daba en cada generación y «recesivo» al que reaparecía, y supuso que formaban una unidad productiva, compuesta por dos factores. Cada factor estaba formado por un par de elementos,

de los que cada individuo aportaba uno a la célula sexual. Enunció dos leyes naturales: la de la segregación equitativa y la de la segregación independiente, por la que los caracteres diferentes son heredados de forma independiente. Sin embargo, en realidad Mendel estaba navegando en aguas que desconocía, un hecho que es patente en el lenguaje que empleó en su artículo. Así, leemos: «El que dé un vistazo a las coloraciones que se originan en las plantas ornamentales por fecundaciones semejantes no podría sustraerse fácilmente a la convicción de que, aun aquí, tiene lugar el desarrollo según una ley determinada, que halla probablemente su fórmula en la combinación de varios factores de color independientes». O: «Se comprenderá que la pretensión de reducir las diferencias fundamentales en el desarrollo de los híbridos a una asociación permanente o *pasajera* de los elementos celulares dispares solo puede tener el valor de una hipótesis, a la cual la falta de datos seguros deja un amplio campo experimental». Hoy llamamos a esos factores de color «independientes» y a los elementos celulares dispares «genes».

A partir de 1875, la observación microscópica resolvió en menos de dos décadas los misterios de la reproducción celular. Walther Flemming (1843-1905) descubrió unos filamentos que absorbían la tintura de anilina, a los que llamó «cromatinas», rebautizadas por Wilhelm Waldeyer en 1880 como «cromosomas», la palabra griega que significa «cuerpo coloreado». Fue en un trabajo decisivo para la descripción de la reproducción, *Zellsubstanz, Kern und Zelltheilung (Sustancia celular, núcleo y división celular; 1882)*, donde Flemming describió la división asexual (mitosis). Los cromosomas se presentan en pares, procediendo cada elemento del par de uno de los progenitores. En la mayoría de los organismos la pareja de cromosomas de cada par es del mismo tipo, salvo en un par, en el que la pareja es diferente: son los denominados «cromosomas sexuales».

El número de cromosomas varía según las especies. La mosca del vinagre tiene (contando el total, no las parejas) 8, las palomas 16, el gusano 36, los gatos 38, el ratón 40, los simios 48, las ovejas 54 y los perros 78, mientras que los humanos tenemos 46, esto es, 23 pares, todos iguales menos uno, que caracteriza el sexo de

su poseedor (en las mujeres ese cromosoma sexual está formado por una pareja de igual tipo, XX, mientras que en los hombres no es así: son XY). La determinación del sexo se debe al azar.

Reunidos los cromosomas de los progenitores, comienza la división celular del cigoto, la mitosis, que implica la separación de los cromosomas en dos grupos genéticamente idénticos entre sí. Primero aparecen dos células, luego cuatro y así sucesivamente, produciéndose una agrupación de células, la mórula, a partir de las cuales se desarrolla el embrión. Durante el proceso, se van generando instrucciones que producen que grupos de esas nuevas células se vayan especializando y formen tejidos y órganos. Finalmente, el nuevo ser humano tendrá unos 200 tipos distintos de células, que asumen diferentes formas y funciones, entre ellas células de la piel, glóbulos rojos, células musculares, neuronas, células óseas, folículos pilosos, células adiposas y también, claro, espermatozoides y óvulos. No todas las células viven lo mismo: las células epiteliales tienen una vida de 26 días, las de la pared intestinal de 5, los glóbulos rojos de 120, mientras que las neuronas y las células musculares pueden llegar a vivir hasta 100 años.

En los organismos unicelulares, como las bacterias, que carecen de núcleo, la reproducción se realiza mediante la división de las distintas partes de la célula, lo que da lugar a dos células menores que se limitan a crecer hasta alcanzar las dimensiones originarias (carioquinesis).

Capítulo 19

Moléculas y origen de la vida: de Mendel a Dolly

Contenido:

- §1. *Ácidos nucleicos*
- §2. *El redescubrimiento de Mendel*
- §3. *El ADN, material hereditario*
- §4. *El ADN recombinante*
- §5. *El Proyecto Genoma Humano*
- §6. *La clonación*
- §7. *Células madre*
- §8. *Origen e historia de la vida*

Las moléculas constituyen el pilar fundamental de los procesos orgánicos. Y las hay de muchos tamaños. Las proteínas, por ejemplo, están formadas por aminoácidos y pueden ser visibles a simple vista, mientras que hay moléculas simples (monómeros), compuestos químicos de carbono, hidrogeno y oxígeno como elementos dominantes y un numero de átomos que no llega a 30 y una masa que no supera la de 200 átomos de hidrogeno. La unión de éstas (nucleótidos) por sus extremos da lugar a la formación de largas cadenas compuestas por unidades que, al repetirse, dan origen a macromoléculas, un término este, el de «macromolécula», que fue acuñado por el químico orgánico alemán Hermann Staudinger (1881-1965), con el propósito de distinguir su campo de intereses del de los polímeros, que consideraba moléculas no demasiado grandes: prefería, por consiguiente, hablar de «química macromolecular» (*makrrmolekulare Chemie*) en lugar de «química de polímeros». Esa química macromolecular es la que se ocuparía de las moléculas de la vida, campo que vino a denominarse preferentemente «biología molecular».

§1. Ácidos nucleicos

Hoy podríamos decir que el primer problema que hubo que resolver era el de dónde se encontraban las «unidades de la herencia» que parecían deducirse de los resultados de Mendel; no obstante, recordemos que los trabajos del monje agustino tardaron en ser conocidos (volveremos a este punto más adelante). Aun así, como si fuese una feliz coincidencia, se avanzó en el mencionado problema. Fue el médico británico Archibal Edward Garrod quien dio uno de los primeros pasos en tal dirección. En 1896 Garrod se interesó por pacientes con un raro pero poco dañino trastorno, conocido como «alcaptonuria», cuya manifestación más llamativa es el oscurecimiento de la orina tras su exposición al aire. Después de una serie de estudios, concluyó que tal patología era de naturaleza congénita, esto es, que se heredaba de los progenitores, y no la consecuencia, como hasta entonces se pensaba, de una infección bacterial. Publicó sus resultados en varios artículos, el más conocido y ambicioso de los cuales apareció en 1902 en la revista médica *Lancet*. Su título, «La incidencia de la alcaptonuria: un estudio de individualidad química», ya ofrece indicios de que su autor manejaba ideas en las que aparecía como responsable de la enfermedad objeto de estudio algún tipo de carácter individual —«individualidad química» lo denominaba él—, lo que podía recordar a los «conjuntos de determinantes hereditarios» mendelianos. De hecho, cuando se lee este artículo es difícil no relacionar los resultados de las observaciones con personas (pertenecientes a familias en las que la alcaptonuria aparecía, una generación tras otra, con patrones de dominancia o recesión, en algunos de sus miembros) con los que Mendel había obtenido en sus experimentos con guisantes. Es evidente que Garrod estaba pensando en términos que más tarde se denominarían «genéticos»; que estaba, en realidad, creando (o recreando, si tenemos en cuenta a Mendel) ese pensamiento.

§2. El redescubrimiento de Mendel

Como acabamos de señalar, los trabajos de Mendel tardaron en tener repercusión, concretamente hasta algo más de tres décadas, un hecho seguramente relacionado con los análisis matemáticos que realizó de los resultados de sus experimentos. Su

redescubrimiento se debió a los trabajos que presentaron, de manera independiente, en 1900, el holandés Hugo de Vries (1848-1935), el alemán Cari Correns (1864-1935) y el austríaco Erik von Tschermak (1871-1962).

De los tres científicos citados, el más destacado fue De Vries, un botánico que en 1889 había publicado un libro, *Intercellular pangenesis*, en el que defendía una versión actualizada de la teoría de la pangénesis propuesta por Charles Darwin. Postuló allí la idea de que los caracteres hereditarios tenían su origen en partículas a las que denominó «pangenes», nombre que Wilhem Johannsen recortó en 1909, sustituyendo los términos entonces utilizados por el actual de «gen», para cada uno de los caracteres estudiados por Mendel, al tiempo que introducía los conceptos de «genotipo», para la constitución genética del individuo, y «fenotipo», para la expresión del genotipo en función de un determinado ambiente.

En la década de 1890, De Vries repitió los experimentos de Mendel, a quien no conocía —si bien está considerado como uno de los científicos que descubrieron su obra—, y halló la razón 3:1 de los caracteres. En otro de sus libros, *Die Mutationstheorie (Teoría de la mutación, 1901, 1903)*, encontró un factor fundamental tanto para la teoría de la herencia como para la de la evolución: el cambio accidental en uno de los cromosomas o en el número de ellos que determinaba la aparición de un nuevo individuo que, en caso de fecundación, daba origen a una nueva especie. La concepción darwiniana de la evolución, que imaginaba una sucesión de cambios mínimos y alguna forma de transmisión de los caracteres adquiridos, dio paso al salto evolutivo con una explicación convincente: la modificación accidental del cromosoma.

Otro nombre ilustre —de hecho, más activo que los anteriores— en la recuperación y desarrollo del mundo mendeliano fue el inglés William Bateson (1861-1926), quien después de conocer los trabajos que Garrod estaba acometiendo los interpretó con la ayuda de las ideas de la genética mendeliana, esto es, en base a caracteres dominantes y recesivos (hizo públicas sus ideas en un libro que vio la luz en 1902: *Mendel's Principles of Heredity. A Defence*). Fue Bateson, de hecho, quien acuñó en 1905 la expresión *genetics* («genética»).

Así como Garrod influyó en Bateson, éste lo hizo también en aquél. En un artículo que publicó en 1902 (es decir, inmediatamente después de la aparición del libro de Bateson), Garrod manifestaba: «Ha sido señalado recientemente por Bateson que la ley de la herencia descubierta por Mendel ofrece una razonable explicación de la alcaptonuria». Y añadía más adelante: «sea o no sea cierta la explicación mendeliana, existen pocos motivos para dudar de que las peculiaridades de la incidencia de la alcaptonuria [...] se explican mejor suponiendo que [...] es necesaria para su producción una peculiaridad de los gametos [células sexuales maduras, haploides, capaces de unirse a las del sexo contrario para formar el cigoto] de ambos progenitores».



Thomas H. Morgan

Esa «peculiaridad de los gametos» acabó siendo denominada «genes», término que,

como queda dicho, acuñó en 1909, en su libro *Elemente der exakten Erblchkeitslehre (Elementos de una doctrina exacta de la herencia)*, el danés Wilhelm Johannsen para denominar unas «partículas» hipotéticas que suponía determinaban la herencia y que estarían situadas en los largos cuerpos filamentosos que había identificado Flemming (fue en este libro donde Johannsen introdujo los términos «genotipo» y «fenotipo»).

A la postre, mucho más influyentes que los trabajos de Garrod, tanto para el desarrollo como para la institucionalización de la genética, fueron las investigaciones de Thomas Hunt Morgan (1866-1945), un estadounidense que se distinguió en el estudio de las mutaciones, el proceso responsable de los cambios evolutivos, que contrarrestan la estabilidad de los mecanismos hereditarios básicos. Ahora bien, cuando Morgan llegó, en 1904, a la Universidad de Columbia, en Nueva York, como catedrático de Zoología Experimental, era muy escéptico con respecto al mendelismo, esto es, acerca de una teoría de la herencia que utilizase unidades discretas. Su cambio de actitud se debió, básicamente, a las investigaciones que emprendió con *Drosophila melanogaster*, la mosca de la fruta (o del vinagre), que únicamente posee cuatro cromosomas. En un principio, había intentado estudiar la transmisión de caracteres en ratones y ratas, pero no tuvo éxito. Sólo progresó tras elegir como protagonista de sus investigaciones al citado insecto, que podía producir por millares en simples botellas de leche y que tenía como ventaja adicional que su ciclo vital completo sólo dura diez días; además, los costes de manutención se reducen a unos pocos plátanos. Dadas estas características, pudo realizar sus investigaciones genéticas en una pequeña habitación de 4 x 6 m, conocida como el «cuarto de las moscas».

A partir de 1907, Morgan, primero él solo y luego con colaboradores (Alfred Henry Sturtevant, Calvin Blackman Bridges y Hermann Joseph Muller), intentó estimular mutaciones mediante calor, rayos X y sustancias químicas. Con un equipo extremadamente simple, el cuarto de las moscas proporcionó poco a poco nuevos cimientos a la biología evolutiva. Los resultados que le llevaron a creer en las ideas mendelianas fueron los siguientes: aun cuando no se produjeron en sus cultivos

mutaciones a nivel de especie, encontró que en una de sus botellas apareció repentinamente una curiosa mosca macho de ojos blancos. Denominó «mutación» al cambio, y cruzó al macho mutante con una hembra normal (de ojos rojos). Todos los descendientes mostraron el rasgo normal, esto es, los ojos rojos. Sin embargo, cuando cruzó algunos miembros de la primera generación entre sí, descubrió que el carácter de los ojos blancos aparecía de nuevo, aunque sólo en los machos, nunca en las hembras. Por otra parte, si se cruzaba a un macho de ojos blancos con hembras de la primera generación, la mitad de los descendientes machos y la mitad de las descendientes hembras tenían ojos blancos. Todo muy parecido a lo que había hecho Mendel con los guisantes, así que no es sorprendente que Morgan concluyese que estos resultados podían explicarse sin demasiada dificultad sobre la base de la teoría mendeliano-cromosómica.

No fue la menor de las aportaciones del equipo de Morgan el hallazgo de marcadores cromosómicos que sirvieron para establecer una primera cartografía de los cromosomas. En 1911, uno de los primeros estudiantes de Morgan, el mencionado Alfred Henry Sturtevant, introdujo el primer mapa cromosómico, que finalmente publicó en 1913; en él se mostraban las posiciones relativas de seis genes ligados al sexo. Con ello se pudo defender plausiblemente la tesis de que los genes se encuentran ordenados linealmente en los cromosomas y que experimentan cambios repentinos permanentes, o mutaciones, que producen modificaciones en un rasgo concreto determinado por el gen, tal como el cambio del color rojo de un ojo al blanco.

Una cuestión de especial interés era la de la naturaleza de los genes. Se preguntaba Morgan:

¿Cómo puede ser que tratándose de moléculas orgánicas, se conserven [los genes] invariables, con plena estabilidad? Tal estabilidad significa que el gen es individualizado como una molécula viva, que se mantiene prácticamente invariable a pesar de su metabolismo, o que tiende a evolucionar según un modo definido [...]. Hace unos años me propuse calcular el tamaño de los genes con la esperanza de que se consiguieran

resultados útiles para avanzar en estos problemas. No contamos, sin embargo, con medidas suficientemente exactas para poder evitar razonamientos que no sean nada más que especulativos. Parece, sin embargo, que el volumen del gen es del orden de las mayores moléculas orgánicas. Podría tratarse, en efecto, de una gran molécula, pero es más verosímil pensar que el gen sea una estructura, un conjunto de moléculas orgánicas, relacionadas, por vínculos químicos, por la pura afinidad—como ocurre en el caso de una combinación química— o por otras fuerzas organizadoras.

§3. El ADN, material hereditario

Aunque en 1950, Hermann Muller, que, como señalamos, había sido uno de los colaboradores de Morgan, declaraba que nadie sabía de qué estaban hechos los genes, ya existía por entonces un resultado que habría permitido decir algo al respecto, más concretamente sobre los cromosomas. El responsable de ello era Oswald T. Avery, un médico que nació en Nueva Escocia (Canadá), pero cuya carrera se desarrolló sobre todo en el hospital del Instituto Rockefeller, en la ciudad de Nueva York.

El trabajo que nos interesa lo llevó a cabo Avery con dos colaboradores suyos: Colin MacLeod y Maclyn McCarty. En 1944, en un artículo publicado en el *Journal of Experimental Medicine* titulado «Estudios sobre la naturaleza química de la sustancia que induce transformación de tipo neumococo. Inducción de transformación por una fracción de ácido desoxirribonucleico aislada del neumococo tipo III», afirmaron que los genes se encuentran sumergidos en ácido desoxirribonucleico (ADN).

El ADN era una sustancia química que había sido descubierta en la segunda mitad del siglo XIX por el bioquímico suizo Friedrich Miescher. En 1869, utilizando unos vendajes empapados de pus (una proteína) que le había suministrado un hospital, Miescher aisló una sustancia a la que llamó «nucleína». Visto retrospectivamente, el hecho fundamental de este hallazgo es que el pus se compone de glóbulos

blancos, los cuales, a diferencia de los rojos, poseen núcleos y, por tanto, cromosomas, que, como ahora sabemos, están formados por ADN; esto es, sin saberlo Miescher disponía de una fuente especialmente rica en cromosomas/ADN. De hecho, más tarde él mismo se dio cuenta de que su nucleína, que en la década de 1930 pasaría ya a ser el «ácido desoxirribonucleico» —antes recibió otro nombre: «nucleoproteína»—, estaba en los cromosomas. También en 1869, Felix Hoppe-Seyler, fundador de la revista *Zeitschrift für Physiologische Chemie*, del que Miescher era discípulo, aisló ácido nucleico de una bacteria que se formaba en el pus. Y otro discípulo de Hoppe-Seyler, Albrecht Kossel, identificó, en experimentos que inició en 1879, en la nucleína dos ácidos nucleicos: el, utilizando la terminología que finalmente se impondría, desoxirribonucleico (ADN) y el ribonucleico (ARN), cuyo nombre alude a su importante presencia en el núcleo de la célula. De manera independiente, en 1919 Phoebus Aaron Levene, del Instituto Rockefeller, identificó los componentes del ADN (nucleótidos) y en 1930 describió su composición: un fosfato, un azúcar y una de cuatro bases: adenina (A), timina (T), citosina (C) y guanina (G).

Volvamos ahora al citado artículo de Avery, MacLeod y McCarty. «Desde hace tiempo», escribían, «los biólogos intentan, utilizando medios químicos, inducir en organismos superiores cambios predecibles y específicos que, a partir de ese momento, pudieran transmitirse en serie como caracteres hereditarios». Con tal fin habían elegido microorganismos de un tipo especial, pneumococos, en los que se podían estudiar fácilmente alteraciones hereditarias inducidas experimentalmente, y concluido que la «fracción activa», o el «principio transformador» —los términos que ellos utilizaban, esto es, los elementos celulares responsables de las transmisiones hereditarias, los cromosomas—, «consiste principalmente, si no exclusivamente, de una forma viscosa, sumamente polimerizada, de ácido desoxirribonucleico».

Leyendo pasajes como éstos, surge inmediatamente la pregunta de cómo es posible que Muller realizase las manifestaciones que hizo en 1950, manifestaciones que compartía prácticamente toda la comunidad de biólogos que trabajaban en genética,

más aún teniendo en cuenta que el artículo de Avery, MacLeod y McCarty no pasó en absoluto desapercibido. Lo que sucedió es que las ideas entonces en vigor acerca de la naturaleza molecular del ADN hacían muy complicado pensar que esta sustancia química pudiese ser el vehículo de la información hereditaria. La creencia mayoritaria era que la sustancia hereditaria eran las proteínas. Se pensaba que resultaría mucho más fácil codificar un gran conjunto de información utilizando el alfabeto de veinte letras correspondientes a los aminoácidos de las proteínas que el alfabeto de cuatro letras correspondiente a los nucleótidos del ADN.

Las proteínas podían presumir por entonces de una larga historia. Su nombre fue propuesto en 1838 por Berzelius, después de que el químico holandés Gerardus Johannes Mulder observase que unas sustancias ricas en nitrógeno que se encontraban en todos los animales y plantas parecían tener la misma fórmula empírica, y llegase a la, errónea, conclusión de que podría tratarse de un único tipo de molécula muy grande. Berzelius pensó que esta sustancia albuminosa podría ser la primera molécula de la vida, y por eso propuso el término «proteína». El estudio de las proteínas fue uno de los campos de investigación más complicados de la química orgánica del siglo XIX; no sólo se trataba de compuestos orgánicos muy frágiles cuando se calentaban, sino que unas (como el colágeno o la queratina) eran insolubles en el agua, mientras que otras (la albúmina de los huevos o la caseína) sí se disolvían en agua o en soluciones acuosas de ácidos, bases o sales. Sin entrar en la larga y compleja historia de la química de las proteínas, sí diremos que un momento importante fue cuando en 1902 Emil Fischer, de Berlín, y Franz Hofmeister, de Estrasburgo, propusieron independientemente, durante la reunión anual de la Sociedad Alemana de Científicos y Médicos, que las proteínas están formadas por aminoácidos unidos entre sí por la condensación del grupo amino (NH_2) de uno de los aminoácidos con el grupo carboxilo (COOH) del otro, formando de esta manera enlaces (CONH). Hemos tenido oportunidad de comentarlo en el capítulo 8.

Se conocen 20 aminoácidos básicos, lo que significa que la diversidad de combinaciones posibles (esto es, de proteínas imaginables, en principio) es

gigantesca: una secuencia de 100 aminoácidos puede producir 20^{100} combinaciones posibles. En la década de 1930, Linus Pauling, el especialista en el estudio de los enlaces químicos, con quien nos volveremos a encontrar enseguida, explicó que la estabilidad de las proteínas se debe a la acción de los enlaces de hidrógeno. Frederick Sanger fue el primero en determinar (1945 y 1952) la estructura de una proteína, la insulina, una de las más sencillas que existen: tiene únicamente 50 aminoácidos.

Para avanzar en la comprensión de los mecanismos hereditarios no bastaba con reconocer que los cromosomas contenían ADN, era necesario saber la estructura de esta molécula. Y en este punto entra en escena una técnica física, la difracción de rayos X, propuesta en 1912 por el físico Max von Laue y confirmada por un experimento llevado a cabo en abril de aquel año en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Munich por Walter Friedrich y Paul Knipping. El propósito de este experimento era comprobar si los rayos X eran ondas electromagnéticas de longitud de onda pequeña; si lo eran, como los cristales están formados por átomos distribuidos de manera regular, entonces, al ser las distancias implicadas similares, debían producirse interferencias al hacer incidir los rayos sobre el cristal. Además, midiendo las distancias entre máximos y mínimos de intensidad, sería posible calcular, como se hacía en la óptica ordinaria, la longitud de onda de los rayos X.

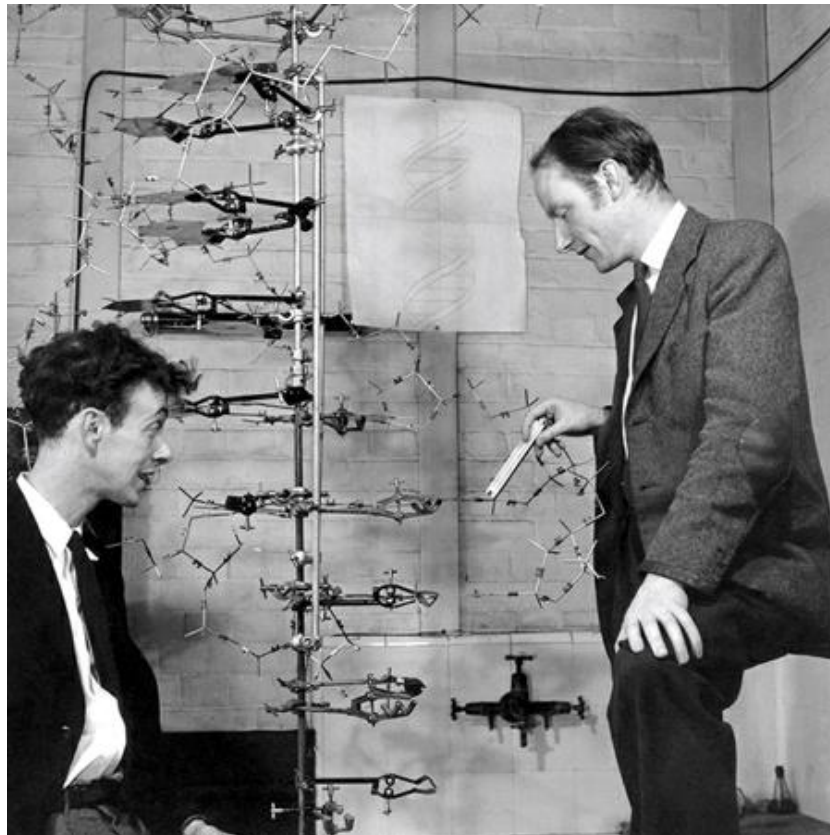
Entre los investigadores que más se distinguieron en la utilización de la difracción de rayos X en biología destaca Max Perutz (1914-2002), un químico austriaco que se trasladó al laboratorio Cavendish de Cambridge, atraído por la fama de John Desmond Bernal, pionero en los estudios cristalográficos que utilizaban la difracción de rayos X. En Viena, Perutz había podido conseguir unos cristales de hemoglobina (la proteína que da color rojo a las células de la sangre) de caballo, y pronto llegó a la conclusión de que su estructura cristalina debía de ser la más sencilla de todas las de las proteínas de peso molecular comparable. Sin embargo, una cosa era que fuera más sencilla que otras macromoléculas y otra que fuese asequible elucidar su estructura; ante la ausencia de un método directo para obtener las posiciones atómicas, parecía imposible intentar abordar una estructura

molecular tan compleja como la de la hemoglobina. De hecho, no fue hasta 1957 cuando Perutz logró dar con el modelo estructural de la hemoglobina, una molécula mucho más compleja desde este punto de vista que el ADN. Pero lo importante es señalar que la presencia de Perutz en el Cavendish reforzó la línea de investigación dedicada a la determinación de las estructuras tridimensionales de sustancias biológicas orgánicas: en 1947, el Medical Research Council creó una Unidad para el Estudio de la Estructura de Sistemas Biológicos, que nueve años más tarde pasó a denominarse «de Biología Molecular». Fue en aquel entorno donde se descubrió la estructura del ADN.

Especialmente importantes fueron los resultados obtenidos por el bioquímico austriaco Erwin Chargaff, afincado desde 1935 en la Universidad de Columbia (Nueva York). Atraído por el estudio del ADN en los trabajos de Avery, Chargaff consiguió aislarlo de núcleos de células y romper las correspondientes moléculas en sus constituyentes, para, utilizando luz ultravioleta y un tipo de análisis cromatográfico, identificar las cuatro sustancias químicas (bases) que constituyen el ADN, las ya citadas adenina, guanina, citosina y timina. Como estas bases absorben luz ultravioleta de longitudes de onda específicas, fue capaz de determinar (midiendo la cantidad de luz absorbida por cada base) qué cantidades de esas bases estaban presentes. Y lo que encontró fue que, aproximadamente, existía la misma cantidad de adenina que de timina, y la misma de guanina que de citosina, unas relaciones que se conocen como «reglas de Chargaff».

Finalmente, merecen mención las fotografías de difracción de rayos X obtenidas por un miembro del grupo que trabajaba en estas cuestiones en el King's College de Londres: Rosalind Franklin (1920-1958). En el King's, interaccionando muy poco con el físico Maurice Wilkins, que dirigía la Unidad de Investigaciones Biofísicas a la que ella estaba asignada, y que se había adentrado desde hacía tiempo en el estudio de la estructura de la molécula del ADN, Franklin obtuvo (mayo de 1952) las primeras fotografías de alta resolución de difracción de cristales de fibras de ADN, que Wilkins enseñó, sin el permiso de ella, a un biólogo estadounidense que ampliaba estudios en el Cavendish y que colaboraba con Francis Crick (1916-

2004): James Watson (n. 1928). Esas fotografías (especialmente una) dispararon la imaginación de Watson y Crick, que llegaron a la conclusión de que el ADN estaba constituido por dos cadenas helicoidales (la doble hélice) unidas entre sí, formada cada una de ellas por cuatro compuestos químicos, combinaciones de carbono, nitrógeno, hidrógeno y fósforo, las ya citadas bases *A*, *G*, *C* y *T*. Éstas componen secuencias determinadas sobre cada hélice, pero de tal manera —según exigían las leyes de Chargaff— que la *T* de una cadena se asocia a la *A* de la otra, y la *G* a la *C*. Cualquier otro emparejamiento está prohibido. Semejante estructura sugiere inmediatamente un posible mecanismo celular reproductivo: en un momento dado de la vida de una célula, la doble hélice se escinde en dos hélices sencillas que, al captar en el medio en que se encuentran los elementos químicos necesarios, reconstruyen la doble hélice de una forma, además, en principio perfectamente fiel, debido a la ley de Chargaff de emparejamiento de las bases.



James Watson y Francis Crick con el modelo de la doble hélice del ADN

Watson y Crick publicaron su propuesta en una escueta nota (de tan sólo una página de extensión) en el número del 25 de abril de 1953 de la revista *Nature*. Se titulaba «Estructura molecular de los ácidos nucleicos. Una estructura para el ácido desoxirribonucleico». En ella incluían una, luego famosa, frase relativa al mecanismo de la herencia al que hemos aludido: «No se nos escapa que el emparejamiento específico que hemos postulado sugiere de inmediato un posible mecanismo de copia para el material genético».

Poco más de un mes después, en el número del 30 de mayo de *Nature*, Watson y Crick publicaron un artículo algo más extenso —aunque tampoco mucho—: «*Implicaciones genéticas de la estructura del ácido desoxirribonucleico*». En él se extendían más sobre los posibles mecanismos hereditarios:

El esqueleto fosfato-azúcar de nuestro modelo es completamente regular, pero cualquier secuencia de pares de bases puede encajar en la estructura. Ello permite que en una molécula larga sean posibles muchas permutaciones diferentes, y por tanto parece probable que la secuencia precisa de las bases sea el código que porta la información genética. Si fuera dado el orden real de las bases de una de las cadenas del par, podríamos anotar el orden exacto de las bases de la otra cadena, a causa de la especificidad del emparejamiento. Así, una cadena es, como si dijéramos, el complemento de la otra, y es este hecho el que sugiere cómo puede autorreplicarse la molécula de ácido desoxirribonucleico.

Discusiones previas sobre la autorreplicación han involucrado, con frecuencia, el concepto de una plantilla, o molde. Se ha supuesto que bien el molde se autocopia directamente o se produce un «negativo» que, a su vez, sirviera de plantilla para producir de nuevo el «positivo». En ningún caso se ha explicado en detalle cómo ocurriría esto en términos de átomos y moléculas.

Ahora, nuestro modelo de ácido desoxirribonucleico es, en efecto, un par de moldes, cada uno de los cuales es complementario del otro. Imaginamos que,

previamente a la duplicación, los enlaces de hidrógeno se rompen, y las dos cadenas se desenrollan y separan. Cada cadena actúa como una plantilla para la formación, sobre ella misma, de una nueva cadena compañera; así que, de hecho, tendremos dos pares de cadenas donde, antes, teníamos solo una. Más aún, la secuencia de los pares de bases se habrá duplicado con exactitud.

El impacto del artículo de Watson y Crick no fue inmediato. Esto se debió a que, aunque el modelo de la doble hélice sugería muchas posibilidades atractivas, existían cuestiones abiertas especialmente importantes que tenían que ver con las proteínas. Se sabía que éstas, piezas fundamentales en la regulación de la vida — desempeñan importantes funciones en las células, como almacenar la energía o catalizar las reacciones—, no se formaban en el núcleo de la célula, sino fuera de él, en el citoplasma, así que ¿cuál era la relación entre ADN y proteínas?, ¿cómo convierten las células los aminoácidos en largas cadenas de polímeros como son las proteínas?

En este punto entra en acción otro compuesto químico, el ácido ribonucleico (ARN). Las primeras evidencias de que el ARN tenía algo que ver con la formación de las proteínas se encontraron a finales de la década de 1930 y comienzos de la de 1940, cuando el sueco Torbjorn Caspersson y el belga Jean Brachet hallaron, de manera independiente, que los cromosomas eran de naturaleza similar a la de los ácidos nucleicos (los que forman, recordemos, el ADN), mientras que el citoplasma era muy rico en ácidos ribonucleicos; más aún, la abundancia de ARN era proporcional a la actividad metabólica de las células, esto es, a su actividad de síntesis de proteínas, y el ADN aumentaba proporcionalmente a la división celular.

La respuesta a esta cuestión llegaría con la idea de que el ARN es un intermediario entre el ADN y la proteína. Fue Francis Crick quien, en 1957, pronunció una conferencia (cuyo texto apareció publicado el año siguiente) en la Sociedad Británica de Biología Experimental, en la que sentó las bases de lo que se denominaría con el poco científico nombre de «dogma central de la biología

molecular». Sus postulados básicos eran los siguientes:

1. El ADN, que contiene la información genética necesaria para construir un organismo en forma de una secuencia continua de nucleótidos, es capaz de replicarse (o duplicarse). Esta propiedad del ADN permite que cada nueva célula, que proviene de una anterior, reciba una réplica exacta de ese ADN y, por tanto, se perpetúe a lo largo de sucesivas generaciones.
2. La información genética presente en el ADN se copia en forma de ARN para que, utilizando la maquinaria de síntesis de proteínas, se traduzca mediante el código genético en las distintas proteínas que realizan los trabajos específicos de cada célula.
3. El flujo de información genética siempre es unidireccional en el sentido de ADN a ARN y de éste a proteína, salvo que, como se ha dicho, la información presente en el ADN puede replicarse en más ADN.

Expresada gráficamente, la conexión que promulgaba Crick era:

$$\text{ADN} \rightarrow \text{ARN} \rightarrow \text{Proteína}$$

Sin embargo, esta concatenación no resultó completamente cierta. Trabajando cada uno por separado, David Baltimore (Massachusetts Institute of Technology) y Howard Temin (Universidad de Wisconsin) demostraron en 1970 que la información hereditaria podía transmitirse también en un sentido inverso: del ARN al ADN, con lo que la relación anterior pasaba a ser:

$$\text{ADN} \leftrightarrow \text{ARN} \rightarrow \text{Proteína}$$

Las ideas de Crick con su «dogma central» —que revisó tras los resultados de Baltimore y Temin— eran, en cualquier caso, ideas sugerentes, pero todavía quedaba mucho que hacer. Finalmente resultó que hay varias clases de ARN. El ARN de transferencia es uno de ellos (para cada aminoácido existe un adaptador

específico de ARN de transferencia). Especialmente importante es el ARN mensajero, que copia una de las cadenas de ADN, identificado por Sydney Brenner, François Jacob y Matthew Meselson en 1961.

Explicado en otros términos, diremos que la replicación es la copia de una de las hebras de ADN, y se realiza en el interior del núcleo. La transcripción es la copia que una enzima, la polimerasa, hace de una secuencia de ADN en una molécula parecida, el ARN, que se distingue del anterior por el carácter abierto de su estructura y por la sustitución de la timina por el uracil. En tanto el ARN permanece en el núcleo, una copia de éste, el ARNm (mensajero), se desplaza al citoplasma, donde se asocia con el ribosoma para formar una proteína. La traducción, también conocida como «síntesis de las proteínas», es la codificación mediante las combinaciones de tres nucleótidos (codon), y forma los 20 aminoácidos conocidos. El código está formado, en consecuencia, por tripletes. Un hilo de ARNm con 300 nucleótidos se codifica con una proteína con 100 aminoácidos.

§4. El ADN recombinante

A finales de la década de 1960 y comienzos de la de 1970 se realizaron una serie de trabajos que cambiaron significativamente la faz de la biología molecular, no sólo por la importancia de los resultados obtenidos, sino por las aplicaciones a las que condujeron, que hicieron posible hablar de «biotecnología» o de «ingeniería genética», la disciplina que se ocupa de unir genes; esto es, de sustituir un segmento de ADN de una célula por uno de otra (al organismo que surge de este proceso se le denomina transgénico). En realidad, la idea subyacente, no las técnicas implicadas, se había introducido en los trabajos de genética vegetal de la estadounidense Barbara McClintock, especialmente con un artículo que publicó en 1931 en el que, utilizando maíz, demostraba que la información genética se intercambiaba durante los primeros momentos de la meiosis. No obstante, sus resultados no adquirieron su verdadero significado hasta que se descubrió el mismo fenómeno en las bacterias en 1960 y en la mosca de la fruta en 1970.

El primer descubrimiento importante tuvo lugar en 1967 (Weiss, Richardson), con el aislamiento de la enzima ligasa, que puede unir cadenas de ADN. El año siguiente, el microbiólogo suizo Werner Arber y uno de sus colaboradores, S. Linn, encontraron en la bacteria *Escherichia coli*, el ocupante habitual e inocuo de nuestro colon, las denominadas enzimas de restricción, que son capaces de cortar por sitios determinados las moléculas de ADN. Una primera aplicación de estas enzimas sirvió para determinar el orden de los genes en los cromosomas, o para analizar la estructura química de los genes, como mostraron Hamilton Smith y su colaborador H. Wilcox, de la Escuela de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, que confirmaron el hallazgo de Arber e identificaron fragmentos de genes. Smith colaboró en la investigación de estos problemas con Daniel Nathans, también en Johns Hopkins, aunque fue Nathans quien, junto con Danna, demostró que el ADN del virus cancerígeno SV40 (de *Simian Virus 40*), que crece en los núcleos en cultivo de células de monos y está formado por unos 5.000 pares de bases, podía ser partido en once fragmentos específicos, cuyo orden determinó el año siguiente.

Disponiendo de semejantes instrumentos, fue hasta cierto punto natural que en 1972 Janet Mertz y Ron Davis, en la Universidad de Stanford, descubriesen que se podía unir muy fácilmente moléculas de ADN cuando se las cortaba utilizando la enzima de restricción *EcoRI*. Las investigaciones de Mertz y Davis fueron muy importantes para que el año siguiente Herb Boyer y Stanley Cohen desarrollasen un método para reordenar moléculas de ADN en un tubo de pruebas con el fin de crear moléculas híbridas procedentes en parte de, por ejemplo, ADN de una mosca y en parte de ADN bacterial. Fue entonces cuando realmente se abrió la nueva era del ADN Recombinante.

§5. El Proyecto Genoma Humano

Los avances que se estaban llevando a cabo en el conocimiento de la estructura del ADN condujeron a que se plantease la idea de estudiar con detalle, de manera completa, toda la estructura genética (el genoma) de cadenas de ADN. Pensemos

que pequeños cambios en la estructura (química) de los genes puede tener consecuencias muy importantes en las características (positivas o no) de los seres vivos. En 1986, por ejemplo, un equipo de investigadores estadounidenses identificó el defecto genético responsable de un tipo de distrofia muscular. En 1989, un equipo de biólogos anunció el descubrimiento de la situación del gen que, cuando sale defectuoso, produce la fibrosis quística, una enfermedad que afecta a los pulmones y el páncreas entre otros órganos. En 1993, se localizó el gen de la corea de Huntington, trastorno que produce una degeneración progresiva del cerebro que viene acompañada de la aparición de fuertes movimientos incontrolados y que conduce, inevitablemente por el momento, a la muerte.

El primer gran programa de secuenciación genómica fue el correspondiente al humano. En 1984 se propuso la creación de un consorcio internacional para secuenciar el genoma humano. No obstante, su establecimiento formal se demoró hasta septiembre de 1988, liderado por Estados Unidos, pero con la participación de otros países: Gran Bretaña, Francia, Japón, China y Alemania. Destinado a obtener un conocimiento que, además de contribuir al avance de la ciencia, estaba previsto que tuviera consecuencias evidentes para combatir enfermedades o anomalías genéticas, era evidente que su objetivo tenía interés también para la industria privada. Semejante interés no tardó demasiado en manifestarse: lo haría a través de una compañía comercial fundada en 1998, Celera Genomics, a la que volveremos enseguida, dirigida por el biólogo molecular Craig Venter.

En 1992 Venter fundó el Institute for Genomic Research (Instituto para la Investigación Genómica), donde desarrolló un procedimiento pionero para identificar genes en cadenas de ADN, una técnica (denominada *shotgun*) completamente diferente a la que se estaba utilizando en el Proyecto Genoma Humano; mientras que éste buscaba identificar un gen cada vez, el método de Venter rompía el genoma en millones de fragmentos que se solapaban, las secuencias eran leídas por máquinas, para, finalmente, mediante poderosos computadores, reunir los datos en un secuencia completa de genoma. Con su método, diez veces más barato que el empleado por el proyecto público, y más

rápido, Venter secuenció el genoma de una bacteria, *Hemophilus influenzae*, que produce meningitis y sordera; el primer genoma completo de un organismo vivo completado en la historia —los resultados fueron publicados en 1995—.

En 1998, Venter anunció su intención de determinar la secuencia del genoma humano, lo que, evidentemente, implicaba competir con el proyecto público. Para alcanzar tal fin, en junio de 1998 constituyó, aliándose con Applera Corporation, la compañía Celera Genomics, en la que él era al mismo tiempo presidente y principal oficial científico. Enseguida la compañía afrontó la tarea de secuenciar el genoma de la mosca *Drosophila melanogaster*, cuyo sistema nervioso central tiene muchos genes en común con el de los humanos. Era obvio que se trataba de un ensayo para enfrentarse al genoma humano. Los resultados de aquel primer proyecto de Celera fueron publicados en *Science* el 24 de marzo de 2000, en un artículo que incluía el nombre de 240 investigadores de todo el mundo como autores. El número de genes que encontraron en la secuencia, que Venter consideraba de una precisión del 99,9%, era de 14.000.

Por entonces, la compañía dirigida por Venter ya estaba firmemente implicada en la secuenciación del genoma humano. De hecho, tres meses más tarde, el 26 de junio, Venter, en su calidad de presidente de Celera Genomics, y Francis Collins, desde abril de 1993 director del Proyecto Genoma Humano, realizaron un primer anuncio conjunto manifestando que habían completado la secuenciación del genoma humano. A pesar de lo grandilocuente de la declaración, aún quedaba bastante que hacer. No se había dicho nada, por ejemplo, sobre cuántos genes forman el genoma humano. El 11 de febrero de 2001 se remediaba tal carencia, anunciándose que el ser humano tiene unos 30.000 genes, frente a los aproximadamente 100.000 que se suponía antes. Tenemos, pues, poco más del doble de genes que una mosca y menos que el arroz, según se comprobó más tarde, cuando, en abril de 2002, un equipo de investigadores formado por miembros del Instituto de Genómica de Pekín y del Centro del Genoma de Washington anunció que el genoma de esta planta cuenta con entre 50.000 y 60.000 genes. El 15 de febrero, el consorcio público presentaba sus resultados en *Nature*, mientras que Celera lo hacía un día

después en *Science*.

§6. La clonación

Otro de los grandes avances de la última década del siglo XX fue la clonación. Y ahí un nombre propio destaca por encima de todo: el embriólogo británico Ian Wilmut. El 27 de febrero de 1997 la revista *Nature* publicó un artículo titulado «Descendencia viable derivada de células fetales y adultas de mamífero», firmado por Wilmut, el líder del grupo, A. E. Schnieke, J. McWhir, A. J. Kind y Keith H. S. Campbell, junto al primero, principal responsable del proyecto. En él se anunciaba que se había conseguido traspasar una frontera muy especial: la reproducción de un mamífero, una oveja —Dolly, nacida en julio de 1996—, transfiriendo la carga genética (el ADN, los cromosomas) del núcleo de una célula de una glándula mamaria (es decir, una célula somática, no germinal) de una oveja adulta a un óvulo no fecundado y enucleado. Se había, en suma, clonado un mamífero.



Ian Wilmut con la oveja Dolly

Es cierto que Dolly no fue el primer clon de un mamífero; en sentido estricto, los

gemelos son clones, pero lo son de un tipo muy diferente: en su caso se trata de una clonación natural, y más absoluta, por cierto, ya que, al surgir de una escisión embrionaria, poseen no sólo idéntico ADN, sino también el mismo citoplasma, mientras que clones como Dolly sólo tienen el mismo ADN que la célula que aporta la carga genética —en la medida en que el ADN no opera aislado, sino que se halla en constante diálogo con su entorno citoplasmático, Dolly no es un verdadero clon de la oveja original, sino simplemente un clon del ADN, o clon genómico—.

Antes, en agosto de 1995, el grupo de investigación que «creó», porque de una creación se trata, a Dolly había producido dos ovejas clónicas de raza Welsh Mountain —Megan y Morag—; la diferencia con Dolly es que procedían de células que, recogidas de embriones de nueve días, fueron cultivadas, diferenciándose en el cultivo. Es decir, habían sido clonadas a partir de células embrionarias, no de células adultas como en el caso de Dolly. Después de Megan, Morag y Dolly, los investigadores del Instituto Roslin continuaron «apretando la tuerca de la creación», dando una vuelta más, una vuelta que anunciaba con claridad lo que vendría en el futuro: en 1997 nació otra oveja, Polly, clonada a partir de células cultivadas y transformadas genéticamente (se les añadió un gen humano durante el proceso).

Un nuevo paso en el camino de la producción de la vida en el laboratorio a partir de elementos químicos fue el que dio en 2010 el citado Craig Venter, quien en mayo de ese año anunció que había conseguido construir un genoma casi idéntico al de una bacteria natural y utilizarlo para producir vida sintética. No es exagerado decir que este resultado es, en más de un sentido, similar al de Wohler cuando produjo la urea en 1828.

§7. Células madre

Otro gran avance en el mundo biológico ha sido el descubrimiento de la existencia de un tipo de células, denominadas «células madre», que poseen la capacidad de convertirse en todo tipo de tejidos de órganos, y que, por consiguiente, pueden

tener aplicaciones muy importantes en, por ejemplo, medicina regenerativa, inmunoterapia y terapia génica. Aunque se pueden encontrar antecedentes, se considera con frecuencia que fueron los canadienses Ernest A. McCulloch y James E. Till quienes, mientras trabajaban en el Instituto del Cáncer de Ontario y en el Hospital Princesa Margarita de Toronto, demostraron su existencia y las caracterizaron. En 1961 publicaron un artículo en esa dirección y en 1963 definieron la propiedad clave de las células madre: su capacidad de diferenciarse en células más especializadas. Comenzaron dando dosis letales de radiación a ratones e inyectándoles después células de médula ósea. Encontraron que cuantas más células les suministraban, mayores probabilidades tenían de sobrevivir. Al tiempo que se preguntaban el porqué de este hecho, descubrieron que algunos ratones tenían extraños bultos en sus bazo. Averiguaron que se trataba de grupos de células que, de alguna manera, habían aparecido como consecuencia de las células de médula ósea inyectadas. En otras palabras, las células de médula ósea daban origen a otros tipos de células, eran, por consiguiente, lo que se denominó «células madre». Advirtiendo esto, en lugar de centrar sus investigaciones en la naturaleza de esas células, se dedicaron a estudiar lo que podían hacer.

Un momento importante en la historia de las células madre fue cuando, en 1994, se aislaron a partir de un blastocisto (embrión de entre una y dos semanas antes de implantarse en el útero materno) procedente de fecundación *in vitro*. No fue, sin embargo, hasta finales de 1998 cuando un grupo de la Universidad de Wisconsin (Estados Unidos) consiguió el primer cultivo (conjunto de células que se dividen continuamente) en laboratorio de células madre embrionarias humanas a partir de blastocistos. En la actualidad ya existen bastantes formas de obtener células madre; uno muy publicitado es a partir de cordón umbilical.

§8. Origen e historia de la vida

Hemos estudiado los mecanismos que subyacen en la transmisión de los caracteres hereditarios de generación a generación. Pero, ¿cómo surgió la vida en la Tierra? Una vida que terminaría produciendo seres que se preguntan sobre el porqué de

ellos mismos.

Los primeros tiempos de la historia de la Tierra (cuyo origen se remonta a unos 4.500 M. a.) debieron de ser bastante convulsos. Junto a una intensa actividad de tipo volcánico, es seguro que fueron muy frecuentes los impactos sobre la superficie planetaria de algunos de los numerosos cuerpos —como meteoritos o cometas— que circulaban por entonces, más o menos caóticamente, a lo largo y ancho del Sistema Solar. Esta actividad iría disminuyendo al reducirse la presencia de esos cuerpos en los entornos de los grandes planetas, una vez que éstos hubiesen ido captando o atrapando un gran número de ellos. Para darnos cuenta de lo que significó aquella época, basta recordar que se cree que la Luna no es sino un «trozo» de la Tierra primigenia, desgajado cuando chocó contra ella un objeto de grandes dimensiones.

La temperatura terrestre en aquellos tiempos —seguramente durante los cien primeros millones de años de vida de la Tierra— tuvo que ser bastante elevada, desde luego lo suficiente como para que no pudiese formarse aún agua, y ésta es un componente esencial para el tipo de vida que conocemos. Se cree que la primera atmósfera de la Tierra, la que surgió como consecuencia de los procesos geodinámicos que tuvieron lugar en su interior y en su superficie, estuvo compuesta sobre todo por amoníaco (NH_3), metano (CH_4) e hidrógeno (H_2). No se pudo formar agua (forma líquida) debido a las altas temperaturas de entonces; sólo existía como vapor a muy alta temperatura, una parte del cual se condensó más tarde, convirtiéndose en agua propiamente dicha cuando disminuyó lo suficiente la temperatura, alcanzando (dependiendo de la presión) los 100 °C, momento en el que se formarían los primeros océanos.

Los objetos que impactaban contra la superficie terrestre, algunos procedentes de estructuras planetarias ya formadas, debieron de aportar muchos elementos que enriquecieron la composición de la superficie y la atmósfera terrestres. Agua, sustancias volátiles e incluso sustancias orgánicas que acaso luego contribuyeron a la aparición de vida son algunas de esas posibles aportaciones procedentes del exterior, que entre otras consecuencias ocasionaron la pérdida del dominio del

metano, el amoniaco y el hidrogeno.

La cuestión —sobre la que abundaremos— de si constituyentes básicos de la vida pudieron llegar a la Tierra en meteoritos u otros cuerpos celestes queda abierta y, por supuesto, posee grandes implicaciones. En mayo de 2016 la revista *Science Advances* publicó un artículo firmado por 32 científicos, encabezados por Kathrin Altwegg, titulado «Elementos químicos prebióticos —aminoácidos y fosforo— en la cola del cometa 67P/Churiuimov- Guerasimenko», en el que se presentaban resultados obtenidos por la sonda espacial de la Agencia Espacial Europea Rosetta, lanzada el 2 de marzo de 2004 con la doble misión de orbitar alrededor del cometa 67P/Churiuimov- Guerasimenko, entre 2014 y 2015, y lanzar un módulo, Philae, para que aterrizase en la superficie, lo que hizo el 12 de noviembre de 2014. En el artículo en cuestión se anunciaba que uno de los aparatos de Rosetta, un espectrómetro de masas, había detectado, en la tenue atmósfera del cometa, la presencia de un aminoácido, el más pequeño, la glicina, y también de fósforo, un componente esencial del ADN y de las membranas celulares.

Se cree que, hace aproximadamente entre 4.400 y 3.800 M. a., la atmósfera terrestre, primitiva pero ya no primera, estaba dominada —ya nos referimos a este punto en el capítulo 17, con relación al efecto invernadero— por la presencia de dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) que de manera creciente se fueron concentrando en los alrededores de zonas volcánicas e hidrotermales. En conjunto, era una atmósfera similar, pero mucho menos densa, a la que existe en la actualidad en Venus.

Ya explicamos (capítulo 17) que en aquel ambiente atmosférico no podían florecer seres consumidores de oxígeno libre, sí plantas, que poseen mecanismos que les permiten consumir dióxido de carbono. Si la atmósfera no hubiese cambiado, la Tierra tendría vida, pero probablemente sería un planeta lleno únicamente de vida vegetal.

El que la atmósfera primitiva se modificase para contener oxígeno libre se debió a la aparición, hace unos 2.000 M. a., de uno o varios linajes de bacterias, ya citadas también en el capítulo 17, que eran capaces de liberar el oxígeno y el carbono del

dióxido de carbono. De esta manera, se fue liberando oxígeno en forma gaseosa, que pasó a la atmósfera, mientras que el carbono era una de las fuentes de alimentación de las plantas.

Parece que, fuese cual fuese el origen de la vida sobre la Tierra, ésta debió de comenzar hace alrededor de algo menos de 4.000 M. a., fecha obtenida a partir de la datación de los fósiles más antiguos con el tamaño y forma de bacterias encontrados en rocas terrestres. Si tenemos en cuenta que la Tierra tiene 4.500 M. a., entonces hay que concluir que, en una escala planetaria, la vida no tardó demasiado en surgir. Y no sólo surgió, sino que se afincó y diversificó con bastante rapidez: en rocas sedimentarias de Australia se han hallado estructuras fósiles, denominadas «estromatolitos», aparentemente restos de aglomeraciones de organismos unicelulares posiblemente emparentados con bacterias o con algas, con una edad de 3.500 M. a.

Sabemos, por tanto, algo del «cuándo», pero ¿y del «cómo»? Uno de los primeros que se planteó esta pregunta de una manera científica, esto es, buscando una respuesta a partir de lo que la química y la física permiten, fue el bioquímico ruso Aleksandr Ivanovich Oparin (1894-1980), autor de un libro de referencia: *El origen de la vida* (1924). Aunque las propuestas de Oparin —ideas similares fueron también planteadas por el inglés John Haldane (1892-1964)— resultarían superadas más tarde (en 1934 se desconocía el papel y estructura del ADN en la vida terrestre), es interesante recordarlas. Dichas propuestas se basaban en la suposición de que en la atmósfera de la Tierra primitiva, que como ya sabemos estaba formada mayoritariamente por amoníaco, metano, hidrógeno y vapor de agua, se habrían producido una serie de reacciones químicas estimuladas por la energía procedente del Sol (en particular, la radiación ultravioleta), las erupciones volcánicas o los rayos producidos en tormentas. Y que en tales reacciones químicas se habrían generado compuestos orgánicos sencillos, precursores de tipos de vida primitiva. De hecho, Oparin especuló con que los primeros organismos vivos debieron de aparecer, a partir de una solución de un coagulado no vivo, semejante a un gel, en los océanos antiguos hace entre 4.700 y 3.200 M. a.



La Tierra primitiva

Tuvieron que pasar treinta años antes de que nuevos experimentos pudieran ir más allá de las ideas de Oparin. Fue Stanley Lloyd Miller quien, en 1956, siendo un estudiante posgraduado en la Universidad de Chicago bajo la dirección de Harold Urey, simuló el efecto de la radiación ultravioleta en la «sopa primigenia» existente en la Tierra primitiva, haciendo pasar una descarga eléctrica de alto voltaje a través de una mezcla de amoníaco, metano, hidrógeno y agua. El resultado de semejante operación fue la aparición de diversos productos químicos entre los que se encontraban varios aminoácidos. Tan sólo tres meses y medio después de haber iniciado su proyecto, que había suscitado recelos en Urey, porque pensaba que era demasiado difícil e incierto para que un estudiante de doctorado se dedicase a él, Miller publicó sus resultados en un artículo que tituló «Una producción de aminoácidos bajo condiciones posibles de la Tierra primitiva». Y obtener aminoácidos es muy importante: las proteínas, las sustancias básicas para la vida, son, recordemos, cadenas muy largas de aminoácidos.

Para que seamos conscientes de la complejidad de los procesos implicados, hay que tener en cuenta, por un lado, que las proteínas están constituidas por muchos aminoácidos (cualquiera poco compleja puede tener un centenar de ellos)

ordenados en secuencias determinadas y, por otro, que los 20 aminoácidos básicos se pueden combinar de muchas maneras. El número que surge de estas posibles combinaciones es extremadamente alto, y, naturalmente, no todas las combinaciones resultantes —proteínas potenciales— son útiles desde el punto de vista biológico. En otras palabras, el «laboratorio de producción de proteínas para la vida» de la Tierra temprana debió de trabajar muy intensamente durante bastante tiempo, si bien si algo hubo fue precisamente mucho tiempo, y, por otra parte, no hay que olvidar que las reacciones químicas pueden ser muy rápidas.

En su experimento, Miller únicamente obtuvo 13 aminoácidos, cuando son 20 los utilizados en la vida terrestre, pero esto no constituyó necesariamente un problema. En primer lugar, porque las primeras formas de vida acaso no utilizaban tantos aminoácidos, y en segundo, porque hay que contar con la posible «ayuda» procedente del espacio; esto es, con lo que aportaban a la Tierra los cometas y meteoritos que llegaban: en uno de ellos, el meteorito Murchison, que se estrelló contra nuestro planeta en Australia, en septiembre de 1969, se encontraron más de 70 aminoácidos diferentes, 8 de los cuales figuran entre los componentes de la vida terrestre.

Los seguidores de Miller introdujeron nuevos métodos y fuentes energéticas. Así, por ejemplo, el estadounidense Melvin Calvin, que obtuvo el Premio Nobel de Química en 1961 por sus trabajos sobre la asimilación del dióxido de carbono por las plantas, obtuvo aminoácidos, azúcares, urea y otras sustancias orgánicas utilizando electrones acelerados en un ciclotrón que lanzó contra una mezcla de metano, amoníaco, hidrógeno y vapor de agua.

En 1960, el español instalado en Estados Unidos Juan Oro combinó algunas moléculas orgánicas, como cianuro de hidrógeno (HCN) y amoníaco, sustancias que han sido detectadas en algunos cometas, en una solución de agua que calentó durante 24 horas a 90 °C, y encontró que había sintetizado adenina ($\text{H}_5\text{C}_5\text{N}_5$), uno de los nucleótidos que componen el ADN y el ARN.

Claro que también está la posibilidad de que cinco moléculas de HCN se combinen produciendo $\text{H}_5\text{C}_5\text{N}_5$, con lo cual, y como ya apuntamos, realmente no se sabe en

qué medida algunos elementos necesarios para la vida pudieron proceder del cosmos o fabricarse en la Tierra. (Asimismo, se han encontrado moléculas orgánicas en nubes de polvo interestelar, cometas y meteoritos; por ejemplo, alcohol etílico, $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$. Probablemente estas moléculas fueron sintetizadas durante la condensación de planetas o en la nebulosa solar de la que terminaría surgiendo también la Tierra).

Otras investigaciones han mostrado que CH_4 y NH_3 , elementos de la atmósfera primitiva, pueden producir HCN, que, como acabamos de ver, puede generar adenina; también, la combinación de metano y moléculas de agua puede dar lugar a formaldehído, CH_2O , que con el cianuro de hidrógeno puede producir diversas moléculas orgánicas.

La demostración de que esto era así llegó tras más experimentos. En la década de 1980, el químico de origen ceilandés Cyril Ponnampereuma, discípulo de Calvin, expuso una solución de HCN a la acción de lámparas ultravioletas; después de una semana encontró adenina, guanina y urea.

Los gases calientes y materiales incandescentes emitidos por los volcanes debieron de ser otra fuente energética disponible en la Tierra primitiva. En 1964, mientras trabajaban en la Universidad de Miami, Sidney Fox y Kaoru Harada simularon este escenario calentando a $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ una mezcla prebiótica de agua, metano y amoníaco, y obtuvieron todos los aminoácidos existentes, salvo dos.

Sin embargo, y a pesar de todos estos avances, estamos todavía lejos de dar el salto que va de los materiales básicos que forman la vida a los organismos vivos más elementales, que, no obstante su aparente simplicidad, son notablemente complicados. En la actualidad sabemos, por ejemplo, que la bacteria intestinal *Escherichia coli*, un diminuto microorganismo apenas visible al microscopio, ocupante habitual e inocuo de nuestro colón, como venimos de comentar, contiene un complejo sistema de moléculas de proteínas y ácidos nucleicos que almacenan una cantidad enorme de información biológica altamente específica. Algunos científicos, como Lynn Margulis, una de las investigadoras más destacadas en el campo del origen de la vida, piensan que los varios miles de genes de *Escherichia*

coli parecen ser el número mínimo de genes que ha de poseer incluso el microorganismo más simple para llevar una existencia autónoma.

No sabemos aún cómo construir estos organismos, ni siquiera el ARN, más simple que el ADN, pero acaso más básico y que bien pudiera haber aparecido antes que éste. Es probable, de hecho, que los sistemas bioquímicos actuales, aquellos con los que estamos ya bastante familiarizados, sólo sean una pequeña muestra de todos los que se ensayaron durante la etapa prebiótica. En última instancia, no debemos olvidar que el camino que estamos intentando recorrer será, sin duda, muy largo. Una molécula normal puede estar formada por 10 átomos, pero una célula tiene del orden de 10^{10} (diez mil millones) de átomos, y un organismo 10^{20} .

Sí sabemos, desde luego, que los elementos químicos carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre fueron fundamentales: todas las moléculas biológicas que existen en la Tierra son combinaciones de estos elementos. No es una hipótesis aventurada suponer que durante los primeros tiempos de la historia del planeta tuvieron lugar múltiples combinaciones de esos elementos bajo condiciones físicas diversas; que se produjeron reacciones químicas de todo tipo, algunas de las cuales generaron moléculas simples (monómeros), que a su vez reaccionaron entre sí formando moléculas más grandes (polímeros). En algún momento de este caos — un caos dirigido por las leyes químicas, en el que los procesos sinérgicos se ven favorecidos— se formaron las moléculas que llamamos «nucleótidos» (combinaciones de ácido fosfórico y desoxirribosa, junto con unos compuestos de C, N, O, H y P, bases nitrogenadas denominadas adenina, A, guanina, G, citosina, C, y timina, T), que a su vez se combinaron para formar estructuras llamadas «ribosomas», constituidas básicamente por moléculas de un tipo de ácido nucleico, el mencionado ARN, capaz de transportar información. Modificaciones subsiguientes dieron lugar a la aparición del ADN.

El «descubrimiento», esto es, la producción, del ARN y del ADN constituyó un momento clave, singular, en la historia de la vida sobre la Tierra: el ADN es la molécula informacional de todos los seres vivos, y desde el punto de vista químico los ADN de, por ejemplo, una bacteria, una planta y un humano son indistinguibles.

Una vez que los procesos de prueba y error dieron lugar al ARN, pudo ocurrir que la evolución del ADN como código genético tuviese lugar con bastante rapidez. Es asimismo posible, como ya hemos apuntado, que se diesen otras formas (macromoléculas) capaces de transmitir información genética, pero que éstas no pudiesen competir con las basadas en ARN y ADN, más adecuadas al medio en el que se encontraban.

Nada ha llegado a suplantar en la Tierra esta forma de codificar la información genética.

El ARN y el ADN constituyen, como vemos, piezas («inventos» de la naturaleza) esenciales en la historia del origen de la vida, pero esa historia no termina ahí, ni mucho menos; necesitó de otros ingredientes, porque ARN y ADN están inmersos en unas estructuras biológicas que les resultan esenciales para, por ejemplo, distinguirlos y salvaguardarlos del entorno o para proporcionarles sistemas de producción de energía con los que funcionar, así como de eliminación de desechos: las células, de las que ya nos ocupamos en otro capítulo. Todas las formas de vida conocidas en nuestro planeta, desde la bacteria más diminuta hasta la secuoya más imponente, pasando por la pequeña lombriz o el inmenso elefante, están formadas por células.

Las primeras células que aparecieron no tenían núcleo, es decir, eran procariotas (ver capítulo 18), poco más que «sacos» rellenos de agua a los que se añadieron ácidos grasos que se fueron ensamblando entre sí espontáneamente para generar membranas. Aparecieron unos 1.000 M. a. después de la formación de la Tierra, ocupándola en exclusiva durante otros 2.000 millones más. Sólo existen dos tipos de procariotas: las bacterias (como las cianobacterias) y las arqueas. Es importante resaltar que las primeras células procariotas debieron ser obligatoriamente anaeróbicas; esto es, tuvieron que ser capaces de sobrevivir en ausencia de cantidades significativas de oxígeno.

De las procariotas, hace unos 1.500 M. a., surgieron, probablemente mediante interacciones simbióticas, las eucariotas, células ya provistas de un núcleo en el que se encuentra el ADN. Los eucariotas poseen una ventaja sobre los procariotas en lo

que a la carga genética se refiere: el núcleo es más favorable para esta carga que el medio citoplasmático. Orgánulos que se encuentran dentro de las células eucariotas, como las mitocondrias, tal vez surgieron a partir de bacterias que la célula ingirió como alimento y que terminaron evolucionando hasta convertirse en las unidades procesadoras de energía, aunque también es posible que las eucariotas se originasen a partir de procariotas con estructuras diferentes.

Si las mitocondrias fueron al principio un tipo de bacteria, es posible que su función inicial al introducirse en una célula eucariota fuese la de ayudar a liberar a ésta del oxígeno. Y es que el oxígeno no es necesariamente beneficioso: químicamente es muy activo y cualquier sustancia química muy activa es también muy destructiva; esto es, puede perder fácilmente su identidad al combinarse con otras.

Reuniéndose en grupos que colaboran entre sí, las células eucariotas dieron paso a otras organizaciones, organismos más complejos, pluricelulares. Estos megaeucariotas terminaron dando lugar a cinco tipos de grupos o reinos: plantas, animales, hongos y dos tipos de algas. Y de ahí a formas superiores de vida, como la nuestra, sólo hay un paso. Aunque darlo llevase mucho tiempo.

Capítulo 20

Evolucionismo. Descendientes de una forma primordial

Contenido:

§1. *Variedad y riqueza de la vida*

§2. *Clasificaciones*

§3. *La evolución de las especies*

§4. *Esbozo de cómo evolucionaron las especies*

§1. Variedad y riqueza de la vida

La variedad de formas y especies vivas, animales y vegetales, existentes en la Tierra es tanta que la necesidad de, primero, descubrir cuáles y cuántas eran, y luego clasificarlas de alguna manera, se hizo pronto manifiesta.

Aristóteles constituye un magnífico ejemplo de tal interés. En uno de sus libros, *Investigación sobre los animales* (*De historia animalium*, según su título latino), «el mejor libro que nos queda de la Antigüedad», según escribió Voltaire en su *Diccionario filosófico*, recorrió el reino animal describiendo la historia, generación, partes y movimientos de unas cuatrocientas especies de animales. En esa misma obra se esforzaba por establecer categorías con las que diferenciar las especies de las que trataba. Si bien antes se había ocupado de cuestiones —también clasificatorias— como órganos de nutrición y modos de reproducción, de vida y de locomoción, en uno de los epígrafes, el titulado «Géneros y especies», escribía:

De los grandes géneros en que se dividen los demás animales citaremos los siguientes: el de las aves, el de los peces y el de los cetáceos. Todos estos están dotados de sangre. Otro género es el de los testáceos, conocidos con el nombre de conchados. Otro, el de los crustáceos que no tienen nombre único para designarlos, y que comprende, por ejemplo, las langostas y ciertas especies de cangrejos y bogavantes. Otro, el de los cefalópodos, como los calamares pequeños, los calamares grandes y las sepias. Otro, el de los insectos. Todos estos últimos animales carecen de sangre, y en caso de tener

pies, éstos son numerosos. Y entre los insectos, algunos también tienen alas. Entre los animales restantes, no se pueden establecer grandes grupos.

Como vemos, carecía de criterios de clasificación que no se refirieran a aspectos morfológicos exteriores.

Un discípulo y amigo de Aristóteles, Teofrasto (c. 372-288 a. C.), completó la obra de aquél con tratados botánicos (como *Historia de las plantas*) que incluían descripciones basadas en la presencia o ausencia de determinados caracteres en especies distintas; esto es, se centró en la morfología (interna y externa) de las plantas, apartándose de esta manera de un método, sencillo aunque finalmente insatisfactorio, como agrupar plantas y animales tomando como criterio el lugar en el que se encontraban.

Es evidente, sin embargo, que los sistemas clasificatorios no permanecen ajenos a la aparición de nuevos animales o plantas. El descubrimiento de América, y la consiguiente exploración de las Indias Occidentales por los españoles y las Orientales por los portugueses, aportó una gran masa de seres desconocidos hasta entonces, una circunstancia que reforzó el sentimiento de que era preciso clasificar, ordenar las diversas manifestaciones, vegetales o animales, de la vida. «En las Indias», escribió el sacerdote José de Acosta, «todo es portentoso, todo es sorprendente, todo es distinto y en escala mayor que lo que existe en el Viejo Mundo». Gonzalo Fernández de Oviedo, después de sus dos primeros viajes, publicó en 1527 por encargo del emperador un *Sumario* y en 1535 la *Historia general y natural de las Indias*. De acuerdo con la tradición que incluía al hombre en la naturaleza, describió a los indios como observador y dio su opinión sobre sus costumbres. La ordenación y explicación de las especies vegetales y animales se ajustaba a los signos externos: árboles y arbustos, animales terrestres y marinos. A falta de un criterio de clasificación, acudía a las apariencias y, como únicamente describía los especímenes desconocidos para los europeos, las comparaciones con los existentes en el viejo continente eran frecuentes. Algo parecido encontramos en la *Historia general de las cosas de Nueva España* de fray Bernardino de Sahagún

(1500-1590), en la que se limitaba a la descripción exterior de las plantas y animales, así como a las formas de su acción y comportamiento. No hay noticias de disecciones ni de clasificación de las especies, más allá del sistema aristotélico.

Una forma específica de investigación fue el envío de un grupo de expertos, dibujantes y ayudantes para observar y representar sobre el papel las particularidades de los países remotos. El descubrimiento del Nuevo Mundo y el viaje por mar al Extremo Oriente abrieron el camino a las expediciones científicas. Destaca en este apartado la promovida por Felipe II, destinada a estudiar la historia natural americana, realizada desde 1571 a 1577 bajo la dirección de Francisco Hernández, quien, a su término, entregó al rey plantas vivas en barriles y cubetas, «sesenta y ocho talegas de simientes y raíces», plantas secas pegadas en hojas, pinturas de vegetales y animales en tablas de pino y treinta y ocho volúmenes con dibujos y textos. Esta obra, sin embargo, no fue publicada, como tampoco lo sería su traducción, con comentarios, de los 37 libros de la *Historia natural* de Plinio el Viejo, una tarea que le ocupó diez años. De ellos, los doce últimos se han perdido, así como los mapas, dibujos y figuras que preparó, acaso en el incendio que sufrió la biblioteca de El Escorial en 1671; los que sobrevivieron se encuentran en la Biblioteca Nacional de Madrid, habiendo sido editados en 1998 por la Universidad Nacional de México. No obstante, la influencia de Hernández se mantuvo después en la obra de Linneo y en la materia médica poslinneana hasta las primeras décadas del siglo XIX.

La culminación del estudio de la naturaleza americana debe situarse en la *Historia natural y moral de las Indias* (1590) del citado sacerdote José de Acosta, cuyo objetivo no fue ya una exposición descriptiva, sino «declarar las causas y razón de las novedades y rarezas» de la naturaleza americana, que el autor integró en su conjunto en el saber científico, con una altura e independencia de criterio que mereció que Alexander von Humboldt calificase la obra de estudio magistral del Nuevo Mundo y de fundamento de la geofísica moderna. Traducido al latín, alemán, neerlandés, francés, inglés e italiano, el tratado de Acosta tuvo veinticinco ediciones fuera de España.

§2. Clasificaciones

En la tarea de clasificar a los seres que se observaban en la naturaleza destacaron inicialmente sobre todo botánicos, como Joseph Pitton de Tournefort, que propuso en 1700 un esquema organizativo ordenado en 22 clases, según la forma de la corola de las plantas, Jakob Hermann, que se basó en los caracteres del fruto, o Augustus Quirinus Bachmann, conocido como Rivinus (los tres vivieron a caballo entre los siglos XVII y XVIII), que dio preferencia a la relación entre el número de pétalos y tres tipos de frutos. Pero por encima de todos ellos, un nombre sobresale: el del naturalista sueco Carl von Linné (1707-1778), cuya existencia estuvo absolutamente centrada en el estudio de los seres vivos presentes en la naturaleza (especialmente las plantas) y en su clasificación. En 1735 publicó un libro, *Systema Naturae per regna tria naturae, secundum clases, ordines, genera, speciescum characteribus, differentiis, synonymis, locis (Sistema natural)*, en el que estableció los principios que habrían de regir el sistema taxonómico que introdujo. En las plantas, la verdadera especialidad de Linné, su método consistía en:

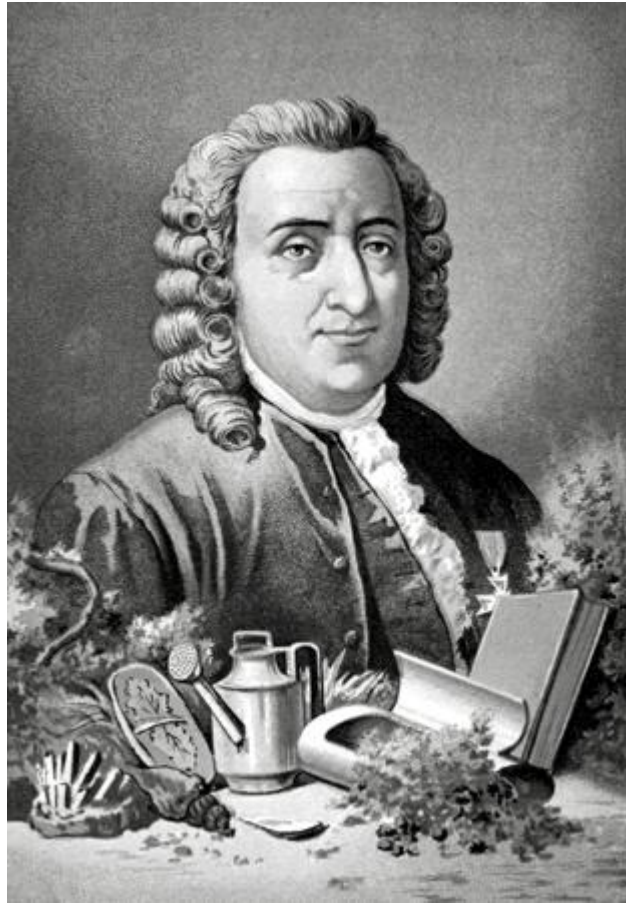
1. contar el número de estambres (órganos masculinos) para determinar la clase;
2. contar el número de pistilos (órganos femeninos) para determinar el orden.

Era un método sencillo, al alcance de cualquiera: sólo había que contar.

A continuación creó un sistema para nombrar las especies, que presentó en otro libro, *Species plantarum (Especies de plantas; 1753)*: la denominada «nomenclatura binomial», formada por dos nombres, el género y la especie (no fue, sin embargo, Linné el primero en proponer un sistema binomial; el botánico y anatomista suizo Gaspard Bauhin [1560-1624], por ejemplo, había recurrido a uno de este tipo en un libro titulado *Pinax theatri botanici* y publicado en 1623).

El género expresa la pertenencia a un grupo de plantas o de animales, mientras que la especie distingue a los del mismo género y puede venir definida por epítetos que se refieren a muy diversas cosas: el origen geográfico, las características

cromáticas, la estructura del organismo, el nombre de una persona, etcétera.



Carl von Linneo

Por ejemplo, *Solanum* es el término latino (el latín era el idioma que utilizaba, y exigía, Linneo) para un género — formado por aproximadamente 1.400 especies— que incluía árboles, arbustos y herbáceas; la patata, que pertenece a este género, se denomina *Solanum tuberosum* («que produce tubérculos subterráneos»), y el tomate es *Solanum lycopersicum* («melocotón de lobo»).

En resumen, si añadimos el concepto de reino, con el que la naturaleza se dividía en tres grupos —reino mineral, reino vegetal y reino animal—, tenemos que el sistema de Linneo organizaba la naturaleza en cinco niveles: reino, clase, orden, género y especie.

Aunque el método clasificatorio de Linneo tenía problemas —los géneros se

establecían más por su apariencia que por un único carácter, lo que les otorgaba un carácter arbitrario, poco científico, podría decirse— y no se libró de las críticas, fue ampliamente aceptado, persistiendo aún, si bien corregido y dentro de un contexto muy diferente, en la actualidad. A pesar de que Linneo se sentía más cómodo con las plantas, se ocupó también, aunque con menos rigor, de los animales. Sin embargo, en este caso no hizo uso de un único elemento para diferenciar las clases, sino que recurrió a uno propio para cada una de ellas. Siguiendo al inglés John Ray (1627-1695), clasificó a los mamíferos según sus dientes, a las aves según sus picos, a los peces por sus aletas, a los insectos por sus élitros (alas anteriores) y a los anfibios e invertebrados de acuerdo con sus características morfológicas. Limitándonos, como ejemplo, a los mamíferos, que para Linneo ocupaban la posición más elevada de la «pirámide natural», los organizó (hacia 1758) de la siguiente manera:

1. *Primates* (preeminentes): hombre, monos, lémures, murciélagos, etc.
2. *Bruta* (pesados): elefantes, manatíes, osos hormigueros, etc.
3. *Ferae* (fieras): focas, perros, lobos, hienas, nutrias, etc.
4. *Bestiae* (bestias): cerdos, armadillos, erizos, topos, etc.
5. *Glires* (roedores): rinocerontes, liebres, conejos, ratones, ardillas, etc.
6. *Pecora* (ganados): camellos, llamas, cabras, jirafas, etc.
7. *Bellua* (cargadores): caballos, burros, cebras, hipopótamos, etc.
8. *Cetae* (marinos): ballenas, marsopas, delfines, etc.

Una clasificación, como vemos, muy arbitraria. Eso sí, se atrevió a incluir en esta escala a los humanos, dentro de los primates. Por tanto, también les aplicó su nomenclatura binomial, denominándolos *Homo sapiens*, lo que no es óbice para que los considerara la cumbre de la creación, el pico más elevado de la creación divina dentro de esa otra cumbre que eran para él los mamíferos. De hecho, Linneo creyó que estaba clasificando la creación divina y no contempló la semejanza como resultado del cambio.

§3. La evolución de las especies

Estricto contemporáneo de Linneo —nacieron el mismo año— fue Georges Louis Leclerc, conde Buffon (1707-1788), autor de numerosas obras, entre ellas una *Histoire naturelle, générale et particulière*, seguramente el texto científico más leído de todo el siglo XVIII (los tres primeros tomos se publicaron en 1749; cubría un rango muy variado de cuestiones, desde las relativas a la Tierra hasta otras relacionadas con las diferentes especies: minerales, pájaros, peces, cuadrúpedos ovíparos, serpientes, humanos, etcétera).

Lo que ahora nos interesa destacar es que Buffon se ocupó bastante de la noción de «especie». Aunque contempló en 1753 la posibilidad del transformismo, Buffon rechazó la idea, redefiniendo el citado término no como un conjunto de individuos que comparten las mismas propiedades, sino como la sucesión de ancestros y descendientes unidos por una conexión material a través de la generación. La especie, decía, «no es el número ni la colección de los individuos que la componen, es la sucesión continuada y la renovación ininterrumpida de los individuos que la componen», palabras con las que hacía de la posibilidad de la reproducción el fundamento de la definición de especie.

La especie constituía, por consiguiente, la unidad mínima de la clasificación; sobre ella se crearon otros conceptos para reunir los grupos más amplios: género, familia, tipo y reino.

Que estas especies se mantuviesen inalteradas o que cambiasen en el transcurso del tiempo era, por supuesto, otra cuestión. Sin embargo, la aparición de fósiles —que dio lugar al nacimiento de una nueva disciplina, la historia de las especies— cuyas formas no parecían corresponderse con las conocidas planteaba problemas para semejante ideas. ¿Cómo explicar, por ejemplo, los trilobites del Cámbrico, los peces del Ordóvico, las plantas terrestres del Silúrico, los tetrápodos del Devónico, los reptiles del Carbonífero, por no recordar más que algunas especies de la era paleozoica? Poco a poco, con creciente intensidad después, fueron descubriéndose más y más fósiles. En 1787, un fraile, Manuel de Torres, encontró huesos de un

mamífero gigante en las barrancas del río Luján, en el virreinato americano de La Plata. Avisado el virrey don Nicolás del Campo, marqués de Loreto, lo mandó a Madrid, al Real Gabinete de Historia Natural —Carlos III había ordenado que se enviase allí cualquier ejemplar raro—, donde llegó en 1788. Nada se sabía entonces acerca del animal al que podían corresponder los restos, se desconocía todo de aquel «montón de huesos inconexos», como los denominó el disecador del gabinete, Juan Bautista Bru, al que se encargó su montaje —lo completó en 1703—, descubriéndose más tarde que eran de un perezoso terrestre, antecesor de los actuales perezosos, que había vivido en Sudamérica desde el Plioceno hasta unos 8.000 años atrás. Fue Georges Cuvier, que estudió las descripciones de Bru, quien propuso la denominación de «megaterio» («bestia grande»), *Megaterium americanum*, para el animal al que pertenecían esos huesos. En 1824 se dio nombre al megalosaurio (*megalosaurus*, del latín «lagarto grande»), el primero de los diplodocus, y a mediados de siglo se impuso la idea de la explosión de vida en torno a los 530 M. a., caracterizada por el surgimiento de nuevas especies y la diversificación de las anteriores (en el siglo XX se descubrió el lugar del impacto que acabó con los dinosaurios hace 65 M. a. y que permitió la difusión de los mamíferos).

La idea de la aparición de nuevas especies y la extinción de muchas de las conocidas era, evidentemente, contraria a la de una creación única. El Génesis, recordemos —y no se pase de alto la influencia que los escritos bíblicos han tenido a lo largo de la historia— describe la creación de las plantas en el tercer día y la de los animales en el quinto. El relato de la creación del Universo, la insistencia en la bondad de la creación, explicaba la concepción del mundo como una obra perfecta y por consiguiente inmejorable, una muestra de la continuidad sin cambio (fijismo). Se asignaba a un Dios la capacidad —que usó en el principio de los tiempos— de crear todas las especies.

La *Scala naturae* de Aristóteles había colocado a los seres vivos en una serie de planos superpuestos como los peldaños de una escalera, con los gusanos abajo y el hombre en la cima, el mismo lugar en el que el relato bíblico le situaba. En cada

peldaño había una sola criatura y ninguno estaba vacío, de forma que no había lugar para el cambio. Ambos textos coincidían en el carácter completo y cerrado de la creación. San Agustín (354-430) invocó el testimonio del Eclesiastés, *Creavit Deus omnia simul*, para justificar que todo lo que ha existido, existe y existirá fue creado a la vez, aunque se manifieste después. La simiente de las plantas, que se desarrolla tras largos periodos de inactividad, era la ilustración de la unidad de la creación. Y Nicolás Malebranche (1638-1715) introdujo el germen para referirse al carácter singular de aquella, al suponer embutidos unos gérmenes en otros.

La Ilustración, el Siglo de las Luces, con su énfasis en que el modo de acceder a la verdad no era a través de la revelación (religiosa), sino mediante la argumentación y la demostración científica, facilitó que algunos — transformistas o transmutacionistas— cuestionasen seriamente el fijismo. Un ejemplo notable en este sentido es el de Paul Heinrich Dietrich, o en su versión francesa, Paul-Henri Thiry, barón de Holbach, uno de los grandes ilustrados. En el que probablemente fue su libro más importante, *Système de la nature, ou des lois du monde physique et du monde moral* (*Sistema de la naturaleza, o las leyes del mundo físico y del mundo moral*; 1769), encontramos unos pasajes que sorprenden tanto por su audacia como por su clarividencia, si pensamos que fueron escritos noventa años antes de que apareciese *El origen de las especies* de Darwin.

«Cuando alguien pregunte ¿qué es el hombre?», escribía en el capítulo 6 («Del hombre, de su distinción en hombre físico y hombre moral, de su origen»),

diremos que es un ser material, organizado o conformado para sentir, pensar y ser modificado de ciertos modos que le son propios a él sólo, a su organización y a las combinaciones particulares de las materias que se encuentran unidas con él. Si se nos pregunta ¿cuál es el origen que atribuimos a los seres de la especie humana?, diremos que, al igual que los demás, el hombre es un producto de la naturaleza, que se parece a ellos en ciertos aspectos y se encuentra sometido a las mismas leyes, pero difiere en otros y sigue leyes particulares determinadas por la diversidad de su configuración.

Y enseguida se hacía las siguientes preguntas:

¿El hombre ha existido siempre? ¿La especie humana ha sido producida desde toda la eternidad? ¿O, por el contrario, no es sino una producción instantánea de la naturaleza? ¿Ha habido siempre hombres semejantes a nosotros y los habrá siempre? ¿Ha habido siempre machos y hembras? ¿Ha habido un primer hombre del que descendieron los demás? ¿El animal ha sido anterior al huevo, o el huevo ha precedido al animal? Las especies sin comienzo, ¿tampoco tendrán fin? ¿Estas especies son indestructibles o les sucede igual que a los individuos? ¿Ha sido el hombre siempre lo que es, o bien antes de llegar al estado en el que lo vemos se ha visto obligado a pasar por una infinidad de sucesivos desarrollos? ¿El hombre puede estar satisfecho de haber alcanzado un estado fijo, o bien la especie humana debe cambiar todavía? Si el hombre es producto de la naturaleza, se nos preguntará, ¿creéis que esta naturaleza puede producir seres nuevos y hacer desaparecer las especies antiguas?

Preguntas que contestaba manifestando que «las plantas, los animales y los hombres pueden ser considerados productos particularmente específicos de nuestro planeta e inherentes a él en la posición o las circunstancias en que se halla actualmente. Estos productos cambiarían si el planeta, por alguna revolución, llegara a cambiar de lugar».

No muy diferentes, por lo poco sustanciadas en observaciones que estaban, fueron las ideas de un personaje interesante por al menos un motivo: Erasmus Darwin (1731-1802), abuelo de Charles Darwin, un próspero médico, además de poeta, filósofo y botánico, autor de un libro que le valió para ser recordado como uno de los precursores de la teoría evolucionista, *Zoonomia; or the Laws of Organic Life* (*Zoonomía, o las leyes de la vida orgánica*; 1794-1798), una curiosa combinación de hechos e intuiciones que contiene párrafos como el siguiente:

¿Sería demasiado atrevido imaginar que todos los animales de sangre

caliente han surgido a partir de un filamento vivo [...] con la capacidad de adquirir partes nuevas, dotadas con nuevas inclinaciones, dirigidas por irritaciones, sensaciones, voliciones y asociaciones?; y poseyendo así la facultad de continuar mejorando mediante su propia actividad inherente, y de transmitir esas mejoras a su posteridad, ¡un mundo sin fin!

Pero argumentaciones como las de Holbach y Erasmus Darwin, con ser sugerentes, necesitaban de otro tipo de individuos, de naturalistas como Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet, caballero de Lamarck (1744-1829).

Para Lamarck, que desde 1788 trabajaba en el Jardin des Plantes de París, más tarde Museo de Historia Natural, los cambios producidos en las especies a lo largo del tiempo eran resultado de dos factores: el primero, una tendencia natural en el mundo orgánico hacia una complejidad cada vez mayor, y, en segundo lugar, a la influencia del entorno. A este esquema general añadía dos hipótesis:

1. la generación espontánea como medio de dar lugar a las formas de vida más sencillas (pensaba que la vida había comenzado con infusorios producidos por generación espontánea y que el calor y la electricidad produjeron luego formas más complejas), y
2. como medio de producir especies más complejas, el desarrollo, mediante su empleo repetido, de nuevos órganos heredables.

Esta segunda hipótesis, que son las circunstancias las que introducen cambios en los seres vivos y que los nuevos caracteres adquiridos de esta manera se mantienen en la descendencia, convirtiéndose así en hereditarios, se hizo especialmente popular: «la función crea el órgano» o, recíprocamente, «la falta de uso produce su degeneración».

Un lugar en el que defendió con especial concisión y claridad estas ideas fue un libro publicado en 1809: *Philosophie Zoologique (Filosofía zoológica)*. En él encontramos las dos leyes siguientes:

- I. En todo animal que no ha traspasado el término de sus desarrollos, el uso

frecuente y sostenido de un órgano cualquiera lo fortifica poco a poco, dándole una potencia proporcionada a la duración de este uso, mientras que el desuso constante de tal órgano le debilita y hasta le hace desaparecer.

- II. Todo lo que la Naturaleza hizo adquirir o perder a los individuos por la influencia de las circunstancias en que su raza se ha encontrado colocada durante largo tiempo, y consecuentemente por la influencia del empleo predominante del tal órgano, o por la de su desuso, la Naturaleza lo conserva por la generación en los nuevos individuos, con tal de que los cambios adquiridos sean comunes a los dos sexos, o a los que han producido estos nuevos individuos.

Leyes de las que extraía, como un simple corolario, la siguiente proposición:

No son los órganos, es decir, la naturaleza y la forma de las partes del cuerpo de un animal, los que han dado lugar a sus hábitos y a sus facultades particulares, sino que por el contrario, sus hábitos, su manera de vivir y las circunstancias en las cuales se han encontrado los individuos de que proviene, son los que con el tiempo han constituido la forma de su cuerpo, el número y estado de un órgano, y las facultades, en suma, de que goza.

Entre los ejemplos que Lamarck empleaba para sustentar su tesis, uno es particularmente conocido, el de las jirafas; escribía en la *Filosofía zoológica*:

Se sabe que este animal, el más alto de los mamíferos, vive en el interior de África, donde la región árida y sin praderas le obliga a ramonear los árboles. De este hábito, sostenido después de mucho tiempo, en todos los individuos de su raza, resultó que sus patas delanteras se han vuelto más largas que las de atrás, y que su cuello se ha alargado de tal manera, que el animal, sin alzarse sobre las patas traseras, levanta su cabeza y alcanza con ella a seis metros de altura.

Para Lamarck, como vemos, las variaciones se producen en el individuo por causas

debidas a las circunstancias en que vive, y luego se transmiten a su progenie (Darwin no aceptaría tal mecanismo, ni tampoco la biología posterior).

Aunque mucho menos importante que Lamarck para las ideas evolucionistas, es conveniente recordar también a Georges Cuvier (1769-1832), con quien el hallazgo de huesos de grandes dimensiones que no podían proceder de ninguna especie conocida dejó de ser una mera curiosidad. Cuvier se dedicó a buscar restos en la cuenca del Sena y a reconstruir animales (ya mencionamos su interés por el fósil de perezoso de Madrid), y creó la paleontología como una ciencia asociada a la historia natural. Vinculó los restos fósiles con el medio ambiente para descubrir la correspondencia entre ambos y se refirió a las condiciones de existencia al describir este último. La correlación de las partes era una exigencia lógica de la naturaleza del animal y el medio en que vivía. Unas patas fuertes y una dentición robusta eran necesarias para alcanzar y engullir las presas. Aunque se mantuvo fiel al creacionismo, el descubrimiento de especies desconocidas le llevó a aceptar la extinción de algunas, un suceso contrario a la perfección del mundo.

Y así llegamos al hombre que más contribuyó a establecer, desde las evidencias científicas y la argumentación lógica, el evolucionismo: Charles Darwin (1809-1882).

Es bien sabido que Darwin, que no fue un alumno distinguido ni en Edimburgo ni en Cambridge, comenzó a florecer científicamente gracias al viaje que realizó entre diciembre de 1831 y octubre de 1836 en un barco de la marina británica de nombre Beagle, un viaje que le llevó a las islas de Cabo Verde, Río de Janeiro, Montevideo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Santa Fe, la Patagonia y la Tierra del Fuego, al estrecho de Magallanes, Valparaíso, Perú, al archipiélago de las Galápagos, Tahití y Nueva Zelanda, Australia, al cabo de Buena Esperanza, las islas de Ascensión, Canarias y Azores, antes de regresar a Inglaterra.

Con los datos que reunió durante aquellos años, e influido por la lectura de *The Principles of Geology* de Lyell, Darwin comenzó a pensar en términos evolucionistas. Más que una convicción completa en un determinado momento, su conversión en un evolucionista constituyó un proceso gradual, en el que fue

analizando de manera crítica observaciones muy diversas. Un conjunto de esas observaciones procedieron del archipiélago de las Galápagos. Algún tiempo después de abandonar estas islas, probablemente en el verano de 1836, Darwin compuso un cuaderno titulado «Notas ornitológicas» que muestra que ya había comenzado a pensar en la evolución de las especies antes de regresar a su patria. Entre lo que Charles anotó allí se encuentran los siguientes pasajes:

Los individuos de las islas de San Cristóbal e Isabela parecen iguales, pero los otros dos son diferentes. En cada isla se encuentra solo un tipo y las costumbres son indistinguibles. Cuando yo recolectaba ejemplares, los españoles sabían de qué isla provenía cada tortuga por la forma y el tamaño del cuerpo y por las escamas. Si comparo las islas partiendo de los pocos ejemplares de animales que poseo en mi colección y de las aves que las pueblan, y viendo las pequeñas diferencias en cuanto a estructura y el lugar que ocupan en la naturaleza, no puedo sino sospechar que nos encontramos sólo ante variedades. El único caso similar del que tengo conocimiento es la diferencia constante registrada entre el zorro-lobo de las dos grandes islas del archipiélago de las Malvinas. De existir el más mínimo fundamento que explique estos comentarios sobre la zoología de los archipiélagos, habrá que estudiarlo, pues podría dar por tierra con la noción de la estabilidad de las especies.

A las tortugas a las que se refería en el pasaje ha de añadirse lo relativo a los pinzones, esto es, la variación entre los picos de pinzones de islas diferentes, diferencia que se había ido produciendo al acomodarse las especies en principio comunes a condiciones ambientales diversas, hasta el punto de terminar convirtiéndose en variedades distintas, que podían conducir a especies distintas. Fruto de todo esto, entre abril de 1837 y septiembre de 1838 llenó varios cuadernos más de notas con observaciones e ideas sobre un amplio rango de temas. En uno de ellos, el denominado «Cuaderno B», que comenzó a escribir en junio o julio de 1837, aparece un esquema que rara vez deja de ser reproducido en las obras

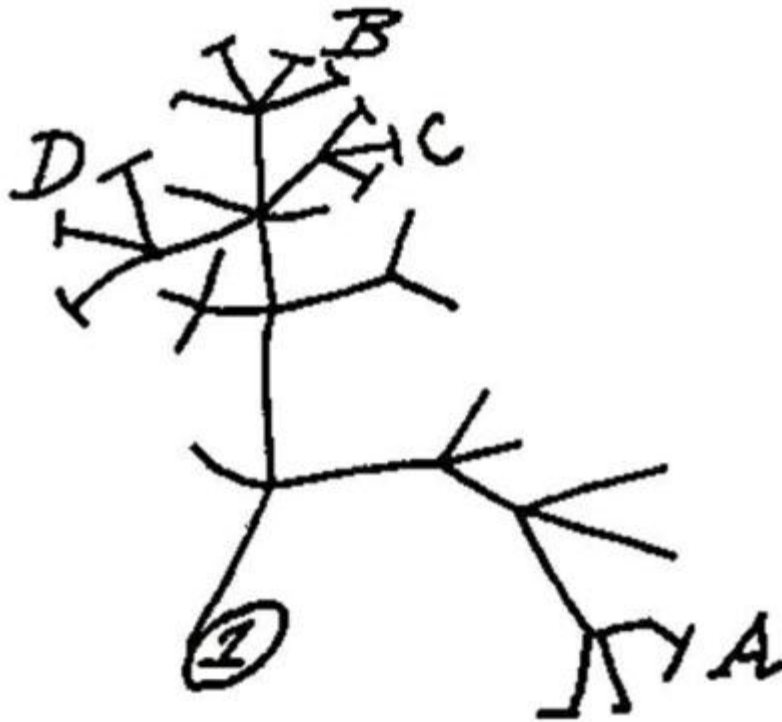
dedicadas a Darwin: unas líneas que semejan un árbol con ramas de las que brotan otras ramas; el árbol de la evolución o de la vida.

Un punto importante es que Darwin conocía las ideas de Lamarck, pero no aceptaba el mecanismo evolutivo que sugería. Y si hablamos de mecanismos que produjesen cambios en las especies, ¿cuál sostuvo Darwin? Porque necesitaba algo, una teoría que diese sentido a la evolución; no bastaba con las observaciones que realizó durante el viaje en el Beagle, ni lo que luego aprendió sobre los cambios producidos por la selección artificial de animales domésticos. Encontró la clave en las ideas del economista Thomas Robert Malthus, tal y como éste las había expuesto en su ensayo de 1826: *An Essay on the Principle of Population* (Un ensayo sobre el principio de población). Como explicó en el capítulo 3 de *El origen de las especies*:

De la rápida progresión en que tienden a aumentar todos los seres orgánicos resulta inevitablemente una lucha por la existencia. Todo ser que durante el curso natural de su vida produce varios huevos o semillas tiene que sufrir destrucción durante algún periodo de su vida, o, durante alguna estación, o de vez en cuando en algún año, pues de otro modo, según el principio de la progresión geométrica, su número sería pronto tan extraordinariamente grande que ningún país podría mantener el producto. De aquí que, como se producen más individuos que los que pueden sobrevivir, tiene que haber en cada caso una lucha por la existencia, ya de un individuo con otro de su misma especie o con individuos de especies distintas, ya con las condiciones físicas de vida. Esta es la doctrina de Malthus, aplicada con doble motivo al conjunto de los reinos animal y vegetal, pues en este caso no puede haber ningún aumento artificial de alimentos, ni ninguna limitación prudente por el matrimonio.

Con la base teórica que le proporcionó Malthus, Darwin continuó tomando notas y explorando nuevas sendas de pensamiento. Hacia 1838, ya poseía los principios básicos para una teoría de la evolución, aunque hasta 1859 no publicó *El origen de las especies*. La razón por la que pasaron tantos años es que Darwin no se

conformaba con algunos indicios, por muy claros que pareciesen. Deseaba estar seguro, y así se convirtió en un infatigable buscador de hechos, de detalles que completasen el gran rompecabezas que quería componer, nada más y nada menos que la historia natural de la Tierra.



El árbol de la vida, según un dibujo de Charles Darwin

En este punto reside precisamente su singularidad: como hemos visto, algunos antes que él pensaron en la existencia de procesos evolutivos, pero contaban con pocas evidencias y mecanismos muy cuestionables (si es que poseían alguno), mientras que Darwin disponía de una idea plausible (la de Malthus) y de una enorme cantidad de datos que la sustentaban. En este sentido, durante las décadas de 1840 y 1850 llevó a cabo estudios y experimentos de todo tipo: sobre, por ejemplo, hibridación, paleontología, anatomía comparada, embriología, variación y cría de palomas y otros animales domésticos, modos de transporte natural que pudiesen explicar la distribución geográfica de los organismos después del origen evolutivo de cada forma en una sola región, un problema que a su vez le condujo a

Posiblemente habría continuado trabajando así para al final —¿quién sabe cuándo?— escribir el gran libro que planeaba sobre la evolución de las especies, si no hubiera sido por un personaje inesperado, Alfred Russel Wallace (1823-1913), que llegó a, básicamente, las mismas conclusiones que él.

En febrero de 1858, Wallace propuso, esencialmente, también inspirándose en Malthus, la misma idea de la selección natural que por lo común se adjudica en exclusiva a Darwin. Y le envió a éste el manuscrito que redactó: «Sobre la tendencia de las variedades a alejarse indefinidamente del tipo original». Cuando Darwin lo recibió, consultó inmediatamente con Lyell y con Hooker, con el resultado de que aquel mismo año se arregló todo para que el artículo de Wallace se publicara en el *Journal of the Proceedings of the Linnean Society* junto con otro (muy breve) preparado rápidamente por Darwin y un extracto de una carta que había enviado a Asa Gray el 5 de septiembre de 1857, explicitando algunas de sus ideas evolucionistas.

Un efecto positivo del artículo de Wallace fue que Darwin decidió entonces escribir rápidamente un libro sobre la teoría en la que llevaba trabajando tanto tiempo, aunque fuese un «resumen» de la más extensa que tenía en mente. El libro *On the Origin of Species by means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (*Sobre el origen de las especies por medio de selección natural, o la preservación de especies favorecidas en la lucha por la vida*).

Comenzaba *El origen de las especies* con una descripción de la variación en estado doméstico, esto es, de la hibridación artificial. «No podemos suponer», señalaba Darwin, «que todas las castas [de animales o plantas] se produjeron de repente tan perfectas y tan útiles como las vemos ahora; realmente sabemos que no ha sido ésta su historia. La clave está en la facultad que tiene el hombre de seleccionar acumulando; la Naturaleza produce variaciones sucesivas, el hombre las suma en una dirección útil para él». Las diferencias individuales dan lugar a las variaciones de la especie cuando son hereditarias: «Toda variación que no es hereditaria carece

de importancia para nosotros». Ahora bien, en este punto —volveremos a él más adelante— la posición de Darwin fue imprecisa: «Las leyes que rigen la herencia son, en su mayor parte, desconocidas. Nadie puede decir por qué la misma particularidad en los diferentes individuos de la misma especie o en diferentes especies es una veces heredada y otras no». La herencia quedaba sin definir, aparecía como aleatoria.

La lucha por la existencia favorece, argumentaba Darwin, al individuo que ha acumulado más variaciones útiles. La selección natural, por oposición a la artificial del hombre, coincide con ésta a la hora de acumular las variaciones favorables a la existencia. Era, en palabras de Darwin, lo mismo que decía Herbert Spencer al referirse a «la supervivencia de los más aptos»: un capítulo de la lucha por la existencia era la lucha por el apareamiento y la reproducción. «El resultado final es que todo ser tiende a perfeccionarse más y más, en relación con las condiciones. Este perfeccionamiento conduce inevitablemente al progreso gradual de la organización del mayor número de seres vivientes en todo el mundo».

Un detalle destacable es que el término «evolución», en la actualidad asociado a la teoría de Darwin, no aparecía en la primera edición de *El origen de las especies*; el naturalista lo empleó por primera vez en su libro *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex (La descendencia del hombre, y la selección en relación con el sexo; 1871)* y en la sexta —y última— edición de *El origen (1872)*, la misma en la que se eliminó el adverbio *On* del título, con lo que se acentuaba la pretensión de carácter definitivo. Tampoco hablaba de «transmutaciones», como había hecho con frecuencia antes; en su lugar utilizaba «modificación y coadaptación», «descendencia con modificación» o «teoría de la descendencia», con la intención, parece, de evitar herir la sensibilidad (y las ideas religiosas) de sus lectores.

En parte por esa prudencia, la de un revolucionario que sin embargo era al mismo tiempo un buen victoriano, un miembro de la élite cultural y social, y en parte porque necesitaba profundizar más en el tema, en *El origen de las especies* evitó aplicar su teoría a los humanos. Sólo encontramos una breve alusión al respecto

casi al final del libro, en el último capítulo, en donde Darwin escribió: «En el futuro distante veo amplios campos para investigaciones mucho más importantes. La psicología se basará sobre nuevos cimientos, el de la necesaria adquisición gradual de cada una de las facultades y aptitudes mentales. Se proyectará luz sobre el origen del hombre y sobre su historia».

En realidad, Darwin pensaba que tal vez la vida procedía de «un corto número de formas o de una sola». De hecho, en la «Conclusión» de *El origen de las especies* escribía, de manera algo más precisa: «Según el principio de la selección natural con divergencia de caracteres, no parece increíble que, tanto los animales como las plantas, se puedan haber desarrollado a partir de algunas [...] formas inferiores e intermedias, y si admitimos esto, tenemos también que admitir que todos los seres orgánicos que en todo tiempo han vivido sobre la Tierra pueden haber descendido de alguna forma primordial». Aunque sea avanzar mucho en el tiempo, mencionaremos que no se equivocaba. En el número del 13 de mayo de 2010, la revista inglesa *Nature* publicó un artículo firmado por Douglas L. Theobald («Una prueba formal de la teoría de un ancestro común universal») que confirmaba, mediante un extenso análisis estadístico realizado entre diversas especies, que toda la vida que ahora existe en la Tierra procede de un ancestro común.

La continuidad en la evolución de la vida terrestre que Darwin defendía se encontraba con un serio problema de falta de evidencias paleontológicas en su favor. El propio Darwin comentó esta dificultad en *El origen de las especies*, en cuyo capítulo VI escribía: «Si las especies han descendido de otras especies por suaves gradaciones, ¿por qué no encontramos en todas partes innumerables formas de transición?». Una pregunta a la que él mismo contestaba: «Creo que la respuesta estriba principalmente en que los registros son incomparablemente menos perfectos que lo que generalmente se supone. La corteza terrestre es un inmenso museo; pero las colecciones naturales han sido hechas de un modo imperfecto y sólo a largos intervalos» (volvía a esta cuestión, con más detalles, en el capítulo X: «De la imperfección de los registros geológicos»).

Otro de los problemas que la teoría de Darwin planteaba era el de cómo surgen y,

sobre todo, cómo se transmiten las variaciones que constituyen el motor de la evolución; esto es, el problema de explicar los mecanismos de la herencia. Aunque nunca lo resolvió, propuso una teoría al respecto, que explicó en otro de sus libros, *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación* (1868). En el capítulo 27, Darwin presentó la teoría de la pangénesis, que básicamente decía que «todas las unidades del cuerpo, tienen juntas el poder [...] de crecer por autodivisión, de expeler átomos independientes y diminutos de sus contenidos, que son las gémulas. Éstas se multiplican y agregan en las yemas y en los elementos sexuales; su desarrollo depende de su unión con otras células o unidades nacientes; y son capaces de transmitirse en un estado latente a las sucesivas generaciones». Hoy sabemos que estas ideas están muy desenfocadas. La pieza de que carecía Darwin era, por supuesto, la genética. Pero de la genética, y de su fundador, Mendel — contemporáneo de Darwin, por cierto, aunque éste nunca supo de sus trabajos — ya tratamos en otro capítulo.

En *El origen* Darwin se había concentrado en las variaciones inducidas en especies animales domesticadas, en la lucha por la existencia, en las leyes de la variación, en las dificultades que encontraba la teoría, en las distribuciones geográficas de especies y en la embriología. Había algo sobre plantas, pero no suficiente. En los años siguientes remedió algunas de estas carencias. En 1862 aparecía el primero de los libros que dedicó a estas cuestiones, sobre todo a la botánica, *On the Various Contrivances by which British and Foreign Orchids are Fertilised by Insects, and on the Good Effects of Intercrossing* (*Los varios procedimientos mediante los cuales las orquídeas británicas y foráneas son fecundadas por los insectos*; 1862), que escribió después de que *El origen de las especies* viese la luz; *The Variation of Animals and Plants under Domestication* (*La variación de los animales y las plantas bajo domesticación*) llegó en 1868, y algo más tarde, *Insectivorous Plants* (*Plantas insectívoras*; 1875), *The Effects of Cross and Self Fertilisation in the Vegetable Kingdom* (*Los efectos de la fertilización cruzada y de la autofertilización en el reino vegetal*; 1876), *The Different Forms of Flowers on Plants of the Same Species* (*Las diferentes formas de flores en las plantas de la misma especie*; 1877)

y *The Power of Movement in Plants* (*El poder del movimiento en las plantas*; 1880). Recluido en su finca, estudió a fondo las plantas e investigó con detalle en el campo y en sus invernaderos, concluyendo que las flores, las orquídeas en particular, habían evolucionado, y que uno de los principales estímulos para ello había sido el atraer insectos con el fin de que éstos contribuyesen a su reproducción sexual.

Después de *La variación de los animales y las plantas bajo domesticación* y antes que *Plantas insectívoras*, Darwin publicó otros dos libros, el ya citado *El origen del hombre* (1871), otra de sus obras capitales, y *The Expresión of Emotions in Man and Animals* (*La expresión de las emociones en el hombre y en los animales*; 1872), que en realidad deberían haber sido uno sólo (no lo fueron por su extensión). De la última de estas obras —que incluía fotografías (heliotipos)— diremos que en ella Darwin ofrecía una explicación natural para las emociones de los humanos y otros animales, refutando la idea de que los músculos faciales expresivos fuesen un atributo único de los primeros. De *El origen del hombre* seleccionaremos este párrafo que aparece en el último capítulo («Resumen general y conclusiones»):

La principal conclusión a la que se ha llegado aquí, y que actualmente apoyan muchos naturalistas que son bien competentes para formar un juicio sensato, es que el hombre desciende de alguna forma altamente menos organizada. Los fundamentos sobre los que reposa esta conclusión nunca se estremecerán, porque la estrecha semejanza entre el hombre y los animales inferiores en el desarrollo embrionario, así como en innumerables puntos de estructura y constitución, tanto de importancia grande como nimia (los rudimentos que conserva y las reversiones anómalas a las que ocasionalmente es propenso) son hechos incontestables.

§4. Esbozo de cómo evolucionaron las especies

Una vez sabido que la vida en la Tierra evolucionó, es conveniente conocer cuáles fueron los caminos por los que transitaron los cambios producidos. Ya hablamos en el capítulo 18 de un organismo ancestral, el antepasado común, al que se ha

bautizado como LUCA (de sus siglas inglesas Last Universal Common Ancestor), una especie unicelular sin núcleo definido, pero en el que ya se había consolidado el flujo genético ADN ARN Proteínas, y que parece pudo haber surgido hace unos 3.850 M. a. A partir de descendientes de LUCA nacieron tres grandes linajes filogenéticos, también introducidos en el citado capítulo: *Archaea*, *Bacteria* y *Eukarya*. Restringiéndonos a este último linaje, el de los eucariotas, sabemos que también ahí se ha introducido un ancestro común, denominado en este caso LECA (Last Eucaryotic Common Ancestor). A partir de LECA y sus inmediatos descendientes los grandes linajes eucarióticos que se encuentran en la biosfera son: *Opisthokonta* (que incluye, entre otros, el reino de los animales, *Animalia*, y el de los hongos, *Fungi*), *Archaeplastidia* (del que formaban parte la mayor parte de los eucariotas fotosintéticos, esto es, el reino *Plantae*), *Excavata* (al que pertenecían varios grupos de protozoos) y *Stramenopila-Alveolata-Rhizaria* (compuesto por diversos grupos de linajes de los difícilmente clasificables protistas).

En el proceso de diversificación de la vida, un momento de especial importancia tuvo lugar durante el Cámbrico (541-485 M. a.), que como vimos forma parte del Paleozoico. Fue entonces, más concretamente en torno a hace entre 540 y 530 M. a., cuando se produjo la denominada «explosión cámbrica». Dentro del reino *Plantae*, aparecieron las plantas terrestres, con paredes celulares formadas por celulosa. No olvidemos que la vida hasta entonces había estado limitada, básicamente, al mar, donde prosperó, evolucionando, durante 3.000 M. a. (una de las razones para que así fuera fue la no existencia, durante mucho tiempo, de una capa de ozono que sirviese de protección ante la nociva radiación ultravioleta procedente del Sol; el agua servía como escudo permitiendo que tuvieran lugar en su seno las reacciones químicas que dieron lugar a organismos «vivos»). No menos importante fue la aparición entonces, también en los mares, de una serie de animales, entre ellos, artrópodos, crustáceos, moluscos, equinodermos y gusanos acuáticos. De los artrópodos surgieron, hace unos 400 M. a., los insectos. Aproximadamente algo más de un tercio de todos los animales modernos conocidos son insectos (se conocen alrededor de algo más de 800.000 especies, aunque

seguramente serán más de dos millones). De hecho, la quinta parte de todos los animales existentes son escarabajos, miembros de un solo orden de los insectos. Especialmente notorio es que éstos fueron los primeros seres con capacidad para volar. Se sabe, no obstante —por los fósiles más antiguos encontrados—, que los primeros especímenes de insectos correspondían a especies sin alas, y no se conocen eslabones intermedios entre los capaces y los incapaces de hacerlo. Tal vez los primeros insectos voladores se desarrollaron a partir de formas más ancestrales que vivían en el agua, moviéndose sobre todo por su superficie, que desarrollarían apéndices, protoalas, adosados a su tórax y abdomen para nadar o desplazarse, y más tarde para correr sobre ella, para dar saltos o para planear sobre distancias cortas. Los beneficios de tales habilidades (como poder escapar más fácilmente de los depredadores) favorecerían que las protoalas se hicieran más grandes, convirtiéndose finalmente en las alas tal y como las entendemos ahora.

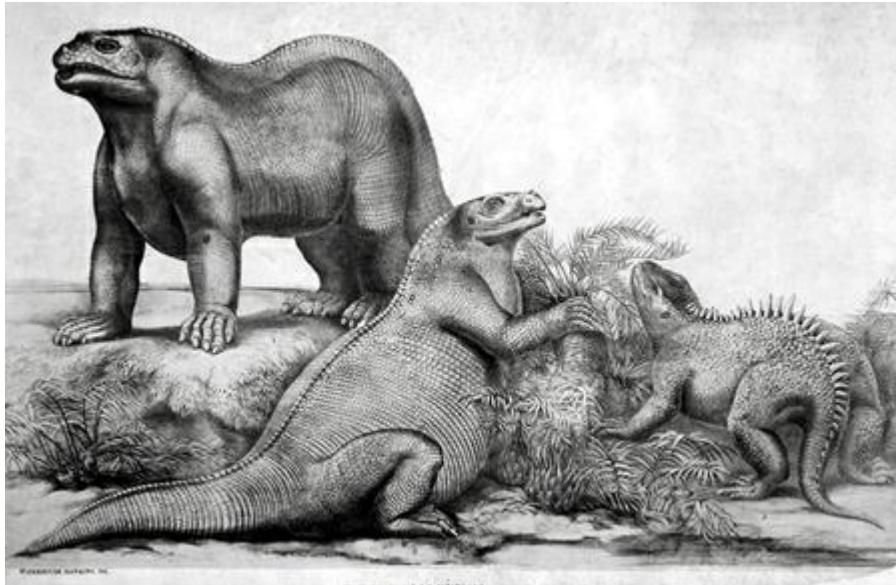
Otra novedad de la explosión cámbrica fue la aparición de unos animales, cordados, que poseían espina dorsal longitudinal y un esqueleto cartilaginoso, pertenecientes a un género denominado *Pikaia* (el nombre proviene de los fósiles encontrados cerca del monte Pika, en el famoso yacimiento de Burgess Shale, en la Columbia Británica). De los cordados surgieron todos los vertebrados, los primeros, variedades de peces. A través de procesos de mineralización, el esqueleto cartilaginoso de algunos peces se transformó en un conjunto de huesos, mucho más resistentes y que permitieron alumbrar, hace unos 370 M. a., animales capaces de vivir tanto en el agua como en la tierra: los anfibios (las aletas se convirtieron en patas y las vejigas natatorias en pulmones). Descendientes de éstos son los reptiles, que aparecieron hace alrededor de 310 M. a. Un conjunto de los miembros de este grupo, una especie ancestral ya perdida, tomó una senda evolutiva que produjo en primer lugar un cruce de caminos, uno de los cuales dio origen a los lagartos y a las serpientes. La otra vía generó, hace alrededor de 210 M. a., dos familias de dinosaurios (nombre propuesto en 1841 por el paleontólogo Richard Owen, compuesto de la raíz griega *deinos*, que significa «terrible», y *sauros*, «lagarto» o «reptil»): los saurópodos, dotados de cuatro patas, y los terópodos, de dos patas,

como el célebre *Tyrannosaurus rex*. Los dinosaurios dominaron la Tierra durante el Jurásico y el Cretácico, esto es, a lo largo de unos 160 M. a. Pero terminaron desapareciendo, junto a otras muchas especies, como consecuencia del impacto sobre el planeta —en la mexicana península de Yucatán, en Puerto Chicxulub, en la costa septentrional, cerca de Mérida— de un asteroide. Como consecuencia de aquel cataclismo se produjo una nube de polvo que envolvió la Tierra durante muchos meses, alterando sustancialmente de esta manera el clima y provocando por consiguiente una gran extinción de especies. Los rastros fósiles de semejante discontinuidad biológica son tan evidentes que los geólogos la han utilizado para definir la frontera —se la conoce como «límite K»; la letra K proviene del término alemán *Kreide*, que significa «creta»— entre el Cretácico, el último periodo del Mesozoico, y el Terciario, o primer periodo del Cenozoico. No fue la primera extinción en masa que ha registrado nuestro planeta —la mayor de las cuatro restantes tuvo lugar en el límite inferior del Pérmico, hace 245 M. a.—, pero sí la más relevante para nuestra especie, ya que, si entre sus víctimas figuraron los dinosaurios, entre los supervivientes, junto a reptiles del tipo de los cocodrilos o las tortugas, se incluyeron los — entonces pequeños— mamíferos, que con el paso del tiempo terminarían generando, merced a procesos evolutivos, especies como la de los humanos.

Antes de aquel mortal choque, de los dinosaurios habían surgido las aves. Es importante en este sentido *Archaeopteryx lithographica*, un fósil que muestra el vínculo entre aves y reptiles: es, de hecho, una forma de transición. Se descubrió en 1861 en la cantera de caliza de Solenhofen, cerca de Pappenheim (Baviera, Alemania), un yacimiento de 145 M. a. de antigüedad. *Archaeopteryx* significa «ala antigua» y *lithographica* hace referencia a la caliza donde se encontró.

Entre las explicaciones que se dan para entender cómo pudieron aparecer las aves a partir de dinosaurios, la más plausible es que los dinosaurios carnívoros, como los terópodos, desarrollaron unas patas delanteras más largas y con garras para poder asir con más fuerza, y que esto favoreció la evolución de músculos que permitían extender con rapidez las patas delanteras y recogerlas, el tipo de movimiento que se

utiliza también para batir las alas al volar. Luego debió de surgir el recubrimiento del cuerpo con plumas, seguramente como aislante.



Dinosaurios. Grabado de Benjamín Waterhouse Hawkins, según las reconstrucciones de Richard Owen

Una vez dotados de estos elementos, bien pudo suceder que los terópodos, que en parte vivían en los árboles, los utilizaran para saltar de un árbol a otro o de un árbol al suelo, transformando finalmente el salto en planeo, con las obvias ventajas que esto conllevaba. También, por supuesto, el vuelo pudo haber surgido de las carreras y saltos que los dinosaurios de dos patas con plumas tenían que realizar para escapar o atrapar presas.

Los antes citados mamíferos se habían originado, hace unos 220 M. a., a partir de un tipo de reptiles, los sinápticos, y sus primeros representantes fueron los ornitorrincos y equidnas actuales. De la diversidad de mamíferos nos interesa ahora uno en especial, *Homo sapiens*, los humanos. Los fósiles encontrados demuestran que formas humanoides, homínidos (familia que incluye a los primates bípedos y los grandes simios) aparecieron hace unos 6 M. a., formas que fueron acumulando más características humanas con el paso del tiempo. Una de las manifestaciones de

esas transformaciones es la expansión del cerebro. El *Pan troglodytes*, un primate homínido de África tropical que junto a los bonobos es el pariente vivo más cercanos a los humanos actuales, de cuya rama evolutiva se separó hace unos 7 M. a., tenía una capacidad craneal (c. c.) de 320 a 480 cm³. Hace entre 4, 2 y 3, 9 M. a., apareció la primera variedad de los *Australopithecus*, la denominada *anamensis*, antepasado del *Australopithecus afarensis* (3, 9-3 M. a.), al que se considera uno de los posibles antecesores del género *Homo* (era bípedo, podía caminar erguido y su c. c. era de entre 380 y 450 cm³), y del *Australopithecus africanus* (3-2, 4 M. a.), cuya c. c. era de 480-520 cm³. El género *Homo* se inició hace entre 1, 9 y 1, 6 M. a. con la especie *Homo habilis*, de c. c. 600 cm³, luego llegó *Homo erectus* (1, 1-0, 01 M. a., c. c. 850-1.100 cm³), que coexistió con *Homo heidelbergensis* (0, 6-0, 2 M. a., c. c. 1.350 cm³) y *Homo neanderthalensis* (0, 2-0, 003 M. a., c. c. 1.500 cm³), *Homo floresiensis* (0, 09-0, 01 M. a., c. c. 400 cm³), y finalmente *Homo sapiens*, cuyos restos más antiguos datan de cerca de hace 200.000 años, dotado de una c. c. de entre 1.600 y 1.400 cm³. Esta especie, la nuestra, sobrevivió a las demás variedades del género *Homo*.

Capítulo 21

De barberos y cirujanos. Salud y enfermedad

Contenido:

1. *Instrumentos*
2. *Las enfermedades orgánicas*
3. *Una nueva farmacología*
4. *Enfermedades infecciosas y teoría microbiana de la enfermedad*
5. *Anestésicos y asepsia*
6. *Antibióticos*
7. *Enfermedades mentales*
8. *Trasplantes*

En el capítulo anterior llegamos a los humanos, de manera que parece obligado terminar este libro deteniéndonos en uno de sus principales intereses, uno que se encuentra en la base de la ciencia: el mantenimiento de la salud y la lucha contra las enfermedades.

La salud se identificó desde el principio de los tiempos con el bienestar físico y mental del individuo que resulta de la normal actividad fisiológica de sus órganos, en tanto que las enfermedades se debían a la disfunción de éstos o a la acción (infección) de agentes patógenos. Se trataba de nociones plausibles, pero poco precisas. De hecho, la mayor parte de la historia de la medicina, hasta el siglo XIX, estuvo dominada por prácticas con escasa base científica, entendida como la capacidad de explicar el origen, la causa, de las enfermedades. Así, por ejemplo, la cirugía tenía que recurrir con frecuencia al ciertamente traumático expediente de la amputación de los órganos destruidos por la enfermedad o los accidentes, como única posibilidad de conservar la vida de los pacientes. Los cirujanos, asociados durante siglos con los barberos, y por tanto no realmente médicos, fueron los primeros en practicar estas operaciones. El ejército y la marina —no las facultades de Medicina— ofrecían las mejores oportunidades de formación. En 1718, el

francés J. L. Petit inventó el torniquete para cortar la efusión sanguínea; esto es, recurrió a un procedimiento puramente mecánico. Y en el mismo siglo el cirujano (también francés) Jacobo Daviel extrajo centenares de cristalinos que se habían vuelto opacos, con resultados inciertos. La importancia de aquella cirugía aún no científica se muestra, por ejemplo, en la fundación de la Real Academia de Cirugía, en París, en 1731, medio siglo antes que la de Medicina, si bien la mejora de la condición de los cirujanos se revela en el hecho de que en 1768 se prohibiera la formación mediante aprendizaje, o en la aparición, en 1791, del primer *Diario de la cirugía*, fundado por Pierre Joseph Desault. No obstante, el hospital y no la facultad continuó siendo el ámbito para el ejercicio de las habilidades de los cirujanos (recordemos en este sentido que la enseñanza práctica de la medicina ante el paciente dio origen al hospital clínico, no siempre asociado a la facultad de Medicina).

Hubo que esperar hasta el siglo XIX para que el conjunto de la medicina se hiciese más científico, y para que, en consecuencia, se produjese una definición de salud más precisa y satisfactoria, como la que ofreció el fisiólogo francés Claude Bernard (1813-1878) en un libro que publicó en 1865: *Introduction á l'étude de la médecine expérimentale (Introducción al estudio de la medicina experimental)*, del que tendremos ocasión de volver a hablar. En esta obra, en la sección 3 del capítulo 1 de la segunda parte, se lee: «La vida se manifiesta en el estado de salud por la actividad normal de los elementos orgánicos, las enfermedades se caracterizan por la manifestación anormal de los mismos elementos; y finalmente, por el intermedio del medio orgánico modificado por ciertas sustancias tóxicas o medicamentosas, puede obrar la Terapéutica de los elementos orgánicos».

Y algo más adelante, en la sección 7 del mismo capítulo:

El examen más superficial de lo que pasa a nuestro alrededor nos demuestra todos los fenómenos naturales de la reacción de los cuerpos unos sobre otros. Hay que considerar siempre el cuerpo en que pasa el fenómeno y las circunstancias exteriores, o el medio que determina o solicita el cuerpo para manifestar sus propiedades. La reunión de estas condiciones es

indispensable para la manifestación del fenómeno... El organismo no es más que una máquina viviente construida de tal manera que hay, por una parte, una comunicación libre del medio exterior con el medio interior orgánico, y por funciones protectoras de los elementos orgánicos para tener los materiales de la vida en reserva y sostener sin interrupción la humedad, el calor y las demás condiciones indispensables a la actividad vital. La enfermedad y la muerte no son sino una dislocación o una perturbación del mecanismo, que arregla la actividad de los excitantes vitales en contacto con los demás elementos orgánicos.

El avance de la anatomía y fisiología patológicas se vio reforzado por el rápido desarrollo de la química, que proporcionó nuevos materiales para estudiar la composición de plantas y animales y las transformaciones que experimentan, constituyendo de hecho una nueva especialidad, que en el siglo XX sería denominada «bioquímica». Por otra parte, el desarrollo del microscopio óptico no sólo sirvió para los hallazgos a los que nos hemos referido en capítulos precedentes, sino que también hizo posible el descubrimiento de agentes patógenos microscópicos, activos pero ignorados hasta entonces, y con los que comenzó una nueva época en la historia de la medicina; de entrada, en lo que a la identificación de la enfermedad (diagnóstico) se refiere, algo que permitía encarar de manera muy diferente que en el pasado el siguiente acto médico, la prescripción del tratamiento. Hasta entonces, en efecto, las únicas enfermedades con una etiología conocida eran las orgánicas; pero el desarrollo de los instrumentos y la introducción de los análisis patológicos dio origen al descubrimiento de la existencia de una nueva patología, las enfermedades infecciosas.

Junto a desarrollos científicos como éstos, hay que tener en cuenta también que el objetivo político del bienestar de la ciudadanía, tan querido por los Gobiernos ilustrados, fue asumido por los constitucionales del ochocientos y que ese bienestar tenía uno de sus principales puntos de apoyo en la salud pública. En el siglo XIX, esta preocupación se manifestó de diversas maneras: en la organización de una red

de hospitales y hospicios para las clases necesitadas, en tanto la burguesía contrataba los servicios de los médicos y las clínicas; en la renovación de la enseñanza de la medicina y en la creación de la enfermería, entendida como una profesión en sí misma, independiente del altruismo individual o religioso. Asimismo, los Gobiernos dotaron a las poblaciones de servicios higiénicos mucho mejores que en el pasado (abastecimiento y depuración de agua potable, evacuación de aguas fecales) y, de acuerdo con la opinión de los médicos, terminaron imponiendo la vacunación obligatoria. Los resultados se vieron en el descenso de la mortalidad infantil, la prolongación de la vida y la disminución del dolor, el primer síntoma de la enfermedad.

De esta forma, casi inadvertidamente, fue configurándose un concepto más moderno de la asistencia médica, tradicionalmente centrada en la relación personal que se establece entre médico y paciente; una relación que consiste, como hemos apuntado, en dos actos sucesivos: la identificación de la enfermedad (diagnóstico) y la prescripción del tratamiento. Hasta el siglo XIX, la prescripción estaba limitada, básicamente, a las técnicas galénicas, como las purgas o sangrías, siendo las únicas enfermedades con una etiología conocida las orgánicas. Como veremos en este capítulo, el desarrollo de nuevos instrumentos médicos y la introducción de los análisis patológicos produjo una nueva patología, la de las enfermedades contagiosas.

§1. Instrumentos

La detección de la enfermedad, el diagnóstico del fallo orgánico, constituía el primer paso para recuperar la salud. Ahora bien, con anterioridad al siglo XIX el mecanismo para identificar la enfermedad en cuestión se limitaba a la observación de los síntomas externos de los trastornos internos. La primera novedad en este terreno se debió al austriaco Joseph Leopold Auenbrugger, que introdujo el método de la percusión torácica en un libro que publicó en 1761, *Inventum novum ex percussione thoracis humani ut signo abstrusos interni pectoris morbos detegendi* (*Nueva invención para diagnosticar enfermedades ocultas del interior del pecho*

mediante la percusión del tórax humano como signo) —en realidad, desde la Antigüedad los médicos habían escuchado los sonidos que se producen en el interior del pecho, pero no asignaron a este método valor como indicador de enfermedades—.

No obstante lo familiar que nos resulta el método de Auenbrugger, que continúa utilizándose en la actualidad, no se generalizó hasta comienzos del siglo XIX. El principal responsable de su recuperación fue el cirujano y profesor de Clínica Médica en el hospital parisino de la Charité (fue también médico de cámara de Napoleón), Jean Nicolas Corvisart, que no sólo publicó en 1808 una traducción al francés del *Inventum novum*, que acompañó con extensas notas y comentarios, sino que se ocupó de difundirlo y destacar sus méritos.



Aplicaciones de los rayos X en medicina

Un discípulo de Corvisart (y también de Bichat), René Théophile Héophile Hacinthe Laennec (1781-1826), avanzó en las ideas de Auenbrugger introduciendo la auscultación del tórax. Una vez utilizado este recurso de urgencia, Laennec sustituyó el rollo de papel por un cilindro de madera con un conducto interno y una pieza en forma de embudo, un instrumento que bautizó con el nombre de «estetoscopio» (de las raíces griegas *esteto*, «pecho», y *escop*, «ver») y que constituyó la mayor innovación diagnóstica hasta el descubrimiento (Röntgen, 1895) de los rayos X, que al ser capaces de atravesar los tejidos permitían ver los huesos. Esta instrumentalización, al menos parcial, de la medicina, o lo que es lo mismo, la introducción de instrumentos físicos como apoyo en el diagnóstico médico, recibió un nuevo impulso con el médico alemán, formado en Berlín, Viena, Breslau y París, Ludwig Traube, que introdujo el termómetro en la medicina clínica hacia 1850.

Aproximadamente al mismo tiempo que así procedía Traube, otro médico alemán, con el que ya nos encontramos a propósito del principio de la conservación de la energía y del vitalismo, Hermann von Helmholtz, inventaba mientras enseñaba en la Facultad de Medicina de Königsberg un instrumento que resultó vital para una de las ramas de la medicina, la oftalmología. Preparando una de sus clases, Helmholtz se dio cuenta de que las sencillas leyes de la óptica geométrica le permitían construir un instrumento de gran importancia potencial para la comunidad médica: el oftalmoscopio. Lo que en realidad Helmholtz pretendía era explicar el fenómeno, observado en 1840 por William Cummings, un médico inglés, y por Ernst Brücke (1819-1892), mediante el cual el ojo humano brilla en una habitación oscura cuando se dirige luz hacia él y un observador permanece próximo a la fuente luminosa. Ni Cummings ni Brücke habían podido ver la estructura interna del ojo; siempre que se acercaban a él lo suficiente como para escudriñar dentro, el destello procedente de la fuente luminosa se difundía sobre toda la pupila. Helmholtz se preguntó cómo producían una imagen los rayos de luz reflejados; se vio conducido de esta manera a estudiar las trayectorias de los rayos, descubriendo que éstos

seguían caminos idénticos tanto al entrar como al salir del ojo, lo que le permitió explicar la incapacidad de Brücke para ver la estructura interna: para observarla habría tenido que situarse directamente en la trayectoria de los rayos, bloqueando así la fuente luminosa. Una vez interesado en el problema, Helmholtz tardó únicamente ocho días en resolverlo y en inventar un instrumento que le permitía ver la retina de un ojo vivo.

Volviendo a la cuantificación de los procesos orgánicos vitales, hay que recordar al médico italiano Scipione Riva-Rozzi, quien en 1896 inventó un sencillo instrumento (tensiómetro) y el procedimiento para estudiar el funcionamiento del corazón: midió la presión de la sangre utilizando una banda de goma rellena de aire, que rodeaba, apretándolo, un brazo. De esta manera bloqueaba al principio la circulación de la sangre por la arteria braquial, liberándola lentamente a continuación.

Aunque el tensiómetro estuvo disponible para su uso antes de finalizar el siglo XIX, la medida de la tensión arterial no comenzó a convertirse en un procedimiento habitual para los médicos hasta aproximadamente tres lustros después. No fue hasta 1912, por ejemplo, cuando los médicos del Hospital General Massachusetts de Boston comenzaron a registrar la tensión arterial de los pacientes que ingresaban en la institución. Fue a partir de entonces cuando empezaron a advertirse riesgos para la salud como la hipertensión, o tensión alta.

La medida de la tensión arterial aporta datos relevantes acerca del funcionamiento del corazón, pero tiene sus límites, que fueron sobrepasados por un nuevo instrumento, introducido por un fisiólogo holandés, Willem Einthoven, quien construyó en 1901 —publicó los detalles en 1903— un sofisticado aparato para representar la traza de la corriente eléctrica que cruza el corazón en cada latido (electrocardiógrafo). Básicamente, lo que hizo fue unir un galvanómetro (para medir la corriente eléctrica) a un aparato que proyectaba una traza de sus medidas en una placa fotográfica, creando así una imagen de la onda eléctrica producida en el corazón. Fue una buena idea, destinada a afincarse sólidamente en la práctica médica, aunque los primeros modelos de electrocardiógrafos (por ejemplo, el que

construyó en 1912 el cardiólogo galés Thomas Lewis) exigían que el paciente colocase sus manos y sus pies en cuatro cubos llenos de agua.

Mencionamos antes los rayos X, la primera técnica de imagen que se introdujo en la medicina. Hija, o por lo menos pariente próxima, de esta técnica es la tomografía axial computarizada (TAC), en la que un tubo emisor de rayos X y un detector giran describiendo un círculo alrededor del paciente. Con la información recogida, un ordenador reconstruye los cortes tomográficos de la zona del cuerpo que se desea analizar. Sus creadores fueron un físico y un ingeniero electrónico, Allan Cormack (1924-1988) y Godfrey Hounsfield (1914-2004). En su conferencia Nobel, Cormack explicó cómo llegó a interesarse por el problema del que surgió la tomografía axial computarizada; es interesante citar lo que dijo en aquella ocasión:

En 1955, yo era Lecturer de Física en la Universidad de Cape Town (Sudáfrica) cuando el físico del Hospital Groote Schuur dimitió. La ley sudafricana exige que un físico propiamente cualificado supervise la utilización de los isótopos radiactivos y como yo era el único físico nuclear en Ciudad del Cabo me pidieron que pasase un día y medio a la semana en el hospital vigilando el empleo de isótopos, algo que hice durante la primera mitad de 1956. Me ubicaron en el Departamento de Radiología bajo la dirección del Dr. J. Muir Grieve y en el curso de mi trabajo observé la planificación de los tratamientos de radioterapia. Una mujer superponía tablas de dosis de isótopos y producía contornos de dosis que el médico examinaba y ajustaba, un proceso que se repetía hasta que se encontraba una distribución de dosis satisfactoria. Las tablas de dosis de isótopos eran para materiales homogéneos y se me ocurrió que, como el cuerpo humano no lo es, los resultados se verían deformados por las inhomogeneidades, un hecho del que, por supuesto, los médicos eran muy conscientes. Pensé que para mejorar la planificación del tratamiento tendría que conocerse la distribución del coeficiente de atenuación de los tejidos del cuerpo [la cuantía de la disminución de intensidad del haz de radiación que se produce al atravesar el cuerpo] y que esta distribución tendría que encontrarse

realizando medidas externas al cuerpo. Pronto se me ocurrió que esta información sería útil para los diagnósticos y que constituiría un tomograma o series de tomogramas, aunque no aprendí la palabra «tomograma» hasta muchos años después.

Cormack también pensó que, si se obtenía el suficiente número de proyecciones con ángulos diferentes, podría lograrse la información necesaria para determinar de manera cuantitativa la estructura interna del organismo y más tarde reconstruir las imágenes de forma que tuvieran utilidad diagnóstica. Aquel mismo año se trasladó a la Universidad de Harvard, en donde se ocupó de desarrollar una teoría matemática para la reconstrucción de las imágenes, teoría que sometió a pruebas mediante una simulación en el laboratorio el año siguiente, cuando regreso a Ciudad del Cabo. Prosiguió allí con la elaboración de su modelo matemático y realizando experimentos de prueba (siempre con fuentes radiactivas); finalmente en 1963 pudo publicar sus conclusiones, que, no obstante, no atrajeron la atención necesaria.

Diez años después de que Cormack se introdujese en estos dominios, Godfrey Hounsfield, del Departamento de Sistemas Médicos de los Laboratorios Centrales de Investigación de EMI (Electrical and Musical Industries), en Londres, comenzó investigaciones parecidas, pero utilizando una fuente de rayos X. Además, fue más allá que Cormack, al construir una máquina real. Primero probó con un cerebro humano conservado en el museo de un hospital cercano, y luego, en 1972, con un paciente, una mujer de la que se sospechaba que padecía una lesión cerebral. La imagen obtenida reveló un quiste circular en el cerebro. Nació así la tomografía axial computarizada, un notable ejemplo de los grandes beneficios que se obtienen cuando se producen alianzas entre física, ingeniería y medicina, por mucho que éstas sean tan casuales y temporales como la que tuvo lugar en el caso de Cormack. Ocho años después, el mismo año en que Hounsfield y Cormack recibieron el Premio Nobel de Medicina, el nuevo sistema se aplicaba en alrededor de mil hospitales del mundo.

Otra técnica de imagen de diagnóstico médico desarrollada en la década de 1970 es la tomografía de emisión de positrones (PET; de Positron Emission Tomography), que utiliza las propiedades de los positrones (la antipartícula del electrón) que son producidos en un ciclotrón: tras recorrer una corta distancia, el positrón choca con un electrón del cuerpo del paciente, momento en que tiene lugar la aniquilación de ambos (como ocurre cuando una partícula y su antipartícula chocan). La energía producida en el proceso de aniquilación se disipa en forma de dos fotones que se mueven en direcciones opuestas y que son detectados mediante un par de sensores, procesándose posteriormente la información recibida, lo que permite detectar cambios en la concentración de los tejidos que contenían los electrones iniciales. Como ha escrito el doctor Pedro García Barreno (*Medicina virtual*; 1997):

La PET ha supuesto una herramienta insustituible para estudiar los mecanismos de las reacciones químicas in vivo y las bases moleculares de la adicción a las drogas y del síndrome de abstinencia, del envejecimiento, de diferentes trastornos neurológicos y enfermedades mentales. Al contrario que las imágenes proporcionadas por la Tomografía Computarizada y la Resonancia Magnética, eminentemente estructurales, las imágenes por PET muestran la bioquímica y la fisiología.

En este sentido, un acontecimiento relevante tuvo lugar en 1973, cuando la PET se utilizó para mostrar la actividad metabólica cerebral: nacía así una nueva neurología.

La mención de los positrones y de los ciclotrones donde se producen nos lleva a otro apartado de la medicina del siglo XX: el de la medicina nuclear, disciplina heredera de la radiactividad. La base de esta rama de la medicina son los radioisótopos, variedades de elementos químicos —recordemos la definición de isótopos, elementos que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica de los elementos, lo que significa que son el mismo elemento, pero que se diferencian en el número de neutrones que albergan en sus núcleos— radiactivos. A mediados de la década de 1930, se hizo patente que un radioisótopo, el sodio-24, que se producía

con cierta facilidad en los aceleradores de partículas, podía tener aplicaciones médicas, debido a que se incorpora a determinadas moléculas del organismo y recorre el cuerpo humano como el sodio ordinario, pero su vida media, 15 horas, era adecuada para realizar estudios sobre la circulación de la sangre: una vez ingeridas cantidades muy pequeñas del mismo, se comprobaba con un contador Geiger que esta sustancia radiactiva llegaba a, por ejemplo, una mano en pocos minutos. Aunque también fue empleado para diagnosticar algunos desórdenes vasculares, el sodio-24 no hizo honor a las esperanzas que se depositaron inicialmente en él; otros radioelementos sí lo harían: el fósforo-32 ha sido utilizado con éxito en, por ejemplo, el tratamiento de la leucemia y en la enfermedad de Hodgkin; el yodo-131, para combatir problemas de tiroides, localización de tumores cerebrales, estudios del riñón, hígado y pulmón; el cobalto-60, en la quimioterapia del cáncer y en estudios de anemia perniciosa, y el tecnecio-99, para explorar cerebro, tiroides, riñones, hígado y bazo.

Una manifestación posterior de las posibilidades médicas de la física nuclear es otra técnica de imagen basada en la resonancia magnética nuclear, un fenómeno identificado en 1946, de manera independiente, por dos grupos dirigidos, respectivamente, por los físicos estadounidenses Felix Bloch, de la Universidad de Stanford, y Edward Purcell, de la Universidad de Harvard, y llevado a la medicina en la década de 1970. El responsable de este nuevo desarrollo fue un médico especializado en cáncer y con experiencia en física, Raymond Damadian. Desde el punto de vista físico, el fenómeno se basa en el hecho de que algunos núcleos atómicos, y en particular el del hidrógeno, cuyo núcleo está constituido por un único protón, se comportan como minúsculos imanes (nanoimanes) cuando se aplica un campo magnético de suficiente intensidad, alineándose los núcleos en cuestión en la dirección del campo. Si entonces el escáner aplica una señal de radiofrecuencia, se perturba esa configuración, que se recupera cuando cesa la señal. Durante el tiempo que tardan los núcleos en retornar a su configuración de alineación, emiten unas señales que detecta un sensor, que las envía a un ordenador en el que, mediante técnicas matemáticas, son convertidas en imágenes que revelan

la distribución del hidrógeno en el organismo. Y como el hidrógeno es, al formar parte del agua, el componente más abundante en el cuerpo humano, y la señal emitida depende de la combinación química de las moléculas del agua, resulta que se pueden obtener imágenes de cualquier tejido del cuerpo y discriminar entre los sanos y los patológicos.



Aparato de resonancia magnética nuclear

La tesis de Damadian fue suponer que los átomos de hidrógeno de tejidos cancerosos reaccionaban de forma diferente en la resonancia magnética nuclear que los de los tejidos normales. Comenzó a trabajar en esta idea en 1971, desarrollando un mecanismo para hacerla operativa, y el 17 de marzo de 1972 solicitaba una patente para «detectar tejidos cancerosos en células corporales». La realización práctica llegó el 3 de julio de 1977, con una máquina bautizada como *Indomitable* (Indomable), con la que tomó la primera imagen topográfica. Sin embargo, la técnica era aún algo primitiva: necesitaba cuatro horas para reconstruir las imágenes línea a línea. Desarrollos posteriores han resuelto éste y otros problemas (actualmente las imágenes se realizan en segundos) y han hecho de la resonancia magnética nuclear (RMN) una técnica médica con múltiples aplicaciones, ya que, a

diferencia de, por ejemplo, las radiografías que muestran sustancias sólidas como huesos, facilita imágenes de gran contraste de los tejidos blandos del cuerpo, permitiendo el seccionado de éste en «láminas» y generando imágenes a distintas profundidades. Asimismo, sirve para estudiar la bioquímica del cuerpo humano *in vivo*.

§2. Las enfermedades orgánicas

Procedimientos como los que hemos descrito en la sección anterior hicieron más científica la medicina, en la medida en que permitieron cuantificar fenómenos orgánicos, pero tales procedimientos únicamente representaban parches que era necesario integrar en una base científica y metodológica más amplia, una base que, de hecho, se fue desarrollando a lo largo del siglo XIX, primero de la mano del desarrollo de la fisiología y luego de lo que vino en denominarse «medicina científica o experimental».

A comienzos del siglo XIX, la fisiología no existía como disciplina independiente; se encontraba firmemente unida a la anatomía, lo que implicaba que las funciones vitales no eran explicadas, si acaso localizadas. Y ello a pesar de que ya habían comenzado a fructificar algunas semillas plantadas antes. Una de esas semillas, la más importante para la cuestión que nos ocupa, fue la teoría de la respiración de Lavoisier y Laplace, según la cual la respiración es una forma de combustión en la que carbono (procedente, por ejemplo, de los alimentos) y oxígeno se oxidan (o, en otras palabras, el oxígeno quema al carbono) convirtiéndose en dióxido de carbono y agua, y desprendiendo calor, el mismo que —argumentaban— se produce en animales de sangre caliente. La respiración, en definitiva, pasaba a ser considerada una forma lenta de oxidación, en la que el oxígeno del aire desempeña el papel principal, y no otros gases que, como el nitrógeno, se encuentran también en el aire y que se exhalan, inalterados, durante el citado proceso.

No fueron, sin embargo, sólo franceses los que se interesaron por la teoría de combustión lavoisieriana. En Alemania, Johannes Müller —a quien mencionamos en el capítulo 8— apreciaba la contribución de esa química a la fisiología, pero

también veía problemas. Reconocía que investigaciones recientes de Dulong y Despretz habían constatado que alrededor de la séptima parte del calor producido en la respiración se podía explicar sobre la base de la formación del dióxido de carbono, pero no aceptaba que hubiese quedado demostrado que el resto del calor se debiera a que la parte de oxígeno inhalado que no se convertía en dióxido de carbono se combinase con hidrógeno para formar agua. Era mucho más probable que el vapor de agua que se detectaba en el aire exhalado procediese simplemente de la evaporación producida en las superficies húmedas de los pulmones, que de la oxidación del hidrógeno. Pero a pesar de reconocer el valor que para la fisiología tenía la química, Müller todavía se movía en un profundo conflicto interno, incapaz de pasar por alto la posible existencia de otras fuerzas no reducibles a las físico-químicas. «Todavía a comienzos de este siglo [el XIX]», recordaba en 1861 uno de sus discípulos, Hermann von Helmholtz,

los fisiólogos creían que era el principio vital el que producía los procesos de la vida, y que se rebajaba la dignidad y naturaleza de ésta si alguien expresaba la creencia de que la sangre era conducida a través de las arterias por la acción mecánica del corazón, o que la respiración tenía lugar siguiendo las leyes habituales de la difusión de los gases. Por el contrario, la generación actual trabaja duramente para encontrar las causas reales de los procesos que tienen lugar en un cuerpo vivo. No suponen que exista ninguna diferencia entre las acciones químicas y las mecánicas en el cuerpo vivo y fuera de él.

Gracias a la química resultante de la revolución que había encabezado Lavoisier, se pudo acometer el análisis de la composición tanto de sustancias inorgánicas como de origen biológico, comprobándose que las primeras contenían elementos presentes también en las segundas, por lo que llegó a aceptarse de modo casi general que no existía diferencia entre ambas desde el punto de vista químico. Un hito en este sentido fue la obtención de la urea, en 1828, a partir del cianato amónico, una sustancia inorgánica, por Friedrich Wohler, cuestión de la que ya nos

ocupamos también en el capítulo 8. Aquellos que combatían los principios vitalistas buscaban dar a la medicina una base científica, demostrando, entre otras cosas, que las enfermedades no eran nada más que desviaciones de los procesos fisiológicos normales. Convencidos de que tales procesos obedecían a leyes deterministas de la naturaleza, argumentaban que la medicina, la verdadera medicina, esto es, la medicina científica, debería encaminarse a determinar cómo se comportaban los cuerpos, sujetos a tales leyes, bajo condiciones alteradas. Así, en sus declaraciones programáticas, estos científicos hacían hincapié en la utilización de experimentos fisiológicos, anatomía patológica, microscopía, química y física. Para llevar a cabo semejante programa necesitaban, por supuesto, instrumentos refinados. Es ilustrativo en este sentido el caso de Emil du Bois-Reymond (1818-1896), quien se distinguió por sus trabajos en electrofisiología, una disciplina cuyos orígenes se pueden asociar con la publicación de las investigaciones de Luigi Galvani, en 1791, con ranas decapitadas y el subsiguiente debate que mantuvo con Alessandro Volta sobre la naturaleza de la electricidad animal. A lo largo de su carrera, Du Bois-Reymond concentró sus investigaciones en el desarrollo de dos tipos de instrumentos: electrodos para la conducción de corrientes bioeléctricas débiles sin distorsión y aparatos para detectar y amplificar estas corrientes. Esta línea de trabajo, en la que medicina, fisiología, química y física se fecundaban y enriquecían mutuamente, terminó, como vimos, conduciendo a la enunciación de una de las herramientas más fecundas para la ciencia de los siglos XIX y XX, el principio de conservación de la energía, formulado en su forma más general por Helmholtz en 1847.

Del espíritu científico que transformó la medicina decimonónica participaban también otras disciplinas médicas. Como la anatomía patológica, el objetivo preferente de médicos como Bichat, quien en su ya citada *Anatomie générale, appliquée à la physiologie et à la médecine*, de 1801, escribió: «La fisiología general es la ciencia biológica fundamental hacia la que convergen todas las demás. Su objeto es determinar la condición elemental de los fenómenos vitales. La patología y la terapéutica se sostienen sobre esta base común. Es gracias a la actividad

normal de los elementos orgánicos como se manifiesta la vida en estado de salud, es la manifestación anómala de los mismos elementos como se manifiesta la enfermedad».

La tesis que Bichat defendía para la fisiología la extendió al conjunto de la medicina más de sesenta años después Claude Bernard, uno de los fisiólogos más notables del siglo XIX, especialmente dotado para la vivisección (se apoyó en ella en muchos de sus numerosos y variados descubrimientos, entre los que se cuentan la detección de la presencia en el proceso digestivo de una enzima del jugo gástrico, el descubrimiento del control nervioso de la secreción gástrica y su localización, o el papel de la bilis y del jugo pancreático en la digestión de las grasas). El lugar en el que defendió programáticamente su visión de la medicina fue su *Introduction á l'étude de la médecine expérimentale* (1865). Para él, «medicina científica» se debía entender en el siguiente sentido:

La medicina científica debe constituirse, como las demás ciencias, por la vía experimental; es decir, por la aplicación inmediata y rigurosa del razonamiento a los hechos que la observación y la experimentación nos suministran. El método experimental, considerado en sí mismo, no es más que un razonamiento por medio del que sometemos metódicamente nuestras ideas a la experiencia de los hechos.

El razonamiento siempre es el mismo, así en las ciencias que estudian los seres vivientes como en las que se ocupan de los cuerpos brutos. Pero en cada género de ciencia varían los fenómenos y presentan una complejidad y dificultades de investigación que les son propias. Ésta es la razón del porqué los principios de la experimentación [...] son incomparablemente más difíciles de aplicar a la Medicina y a los fenómenos de los cuerpos vivientes, que a la Física y a los fenómenos de los cuerpos brutos.

La medicina experimental se extendió por todas las ramas médicas. La observación de los tejidos mediante el microscopio, tema que ya tratamos, dio origen a la anatomía y fisiología patológicas. Virchow, el gran defensor de la teoría celular y

un observador sistemático de las células patógenas, recomendaba a sus alumnos: «aprended a leer microscópicamente». Su hipótesis de trabajo era que la aparición de células anormales constituía el síntoma de la enfermedad; en otras palabras, entendió la enfermedad como una patología celular: «No hay “enfermedades generales”», decía, «todo proceso mórbido está anatómicamente localizado». Así, la multiplicación desordenada de los leucocitos le permitió identificar la leucemia, y la presencia de coágulos de sangre en la arteria pulmonar le llevó a explicar la embolia, accidental que dio nombre (no en vano, su gran libro de 1858 llevaba el título de *Cellularpathologie [Patología celular]*). Además, entre 1863-1864 realizó estudios sobre el cáncer, extrayendo los tejidos dañados para mejorar el diagnóstico y la eliminación de tumores.

El extraordinario desarrollo que se produjo durante el siglo XIX en la química ayudó también, e hizo posible, por ejemplo, determinar la composición molecular de las células, identificándose la presencia de tres compuestos orgánicos: proteínas, carbohidratos y lípidos. De esta manera fue naciendo una nueva especialidad, la bioquímica (un nombre utilizado sobre todo a partir del siglo XX), que estudia la composición y procesos que tienen lugar en las células.

En 1838, el químico holandés Gerardus Johannes Mulder inventaba el término «proteína» (del griego «primero») para designar las sustancias albuminosas que pensaba eran las moléculas primordiales de la vida y a las que consideraba compuestas por un radical que contenía nitrógeno y por pequeñas cantidades de azufre y fósforo. Y en 1902, los químicos alemanes Emil Fischer y Franz Hofmeister propusieron de manera independiente, como ha habido ocasión de comentar, que las proteínas están formadas por cadenas de aminoácidos (en 1926 se identificó la primera: la insulina). Wilhelm Kühne, profesor en Heidelberg desde 1871, utilizó la voz «enzima» para denominar a una proteína particularmente importante, dada su capacidad para actuar como catalizador en las reacciones bioquímicas, de forma que una reacción que tardaría más de 3.000 años se produce en un segundo.

Al hilo de estos desarrollos, fue haciéndose posible comprender el metabolismo;

esto es, el conjunto de las reacciones químicas que se producen en los organismos vivos, para responder a los estímulos exteriores, el desarrollo, la reproducción y el mantenimiento de la homeostasis (un término que introdujo el fisiólogo estadounidense Walter Cannon en 1926), el equilibrio fisiopatológico de las magnitudes vitales.

Simplemente con avances como los anteriores, cambió de forma radical la esencia de la medicina. La detección de la enfermedad y la descripción de sus síntomas no requieren —no al menos un gran número de ellas— un conocimiento científico, y durante milenios el acercamiento a la enfermedad se limitó, hay que insistir en este punto, a los signos externos, sin progresar en el conocimiento de su naturaleza. La doctrina galénica de los humores le permitió construir una teoría de la enfermedad que se vino abajo con aquéllos. Gracias a los desarrollos biomédicos que se produjeron a partir del siglo XIX, surgió una nueva forma de entender y sistematizar —y en consecuencia de combatir (terapéutica)— las enfermedades, basada en el conocimiento anatómico-fisiológico de los órganos, las células y los compuestos orgánicos, así como el de la patología propia de cada uno. La alteración del metabolismo puede afectar al funcionamiento de los órganos. En última instancia todas las enfermedades son orgánicas, aunque usaremos este término para aquellas producidas por la disfunción de uno u otro órgano, debido a causas internas. Dentro de ellas cabe distinguir entre las que alcanzan a diferentes órganos, como el cáncer, y las que se limitan a uno, como la pulmonía o la diabetes. La reproducción celular es un proceso continuo que permite la reposición cotidiana de varios millones de células muertas o dañadas. Cuando las células sobrepasan su duración media de vida se reproducen y experimentan un crecimiento desordenado que da lugar a tumores y se extiende a otras partes del cuerpo (metástasis) por medio de los vasos linfáticos. La enfermedad es la misma en cualquier lugar en que se produzca: piel, pulmón, huesos. Las enfermedades cardiovasculares afectan al corazón y a los vasos sanguíneos, en especial el endurecimiento de las arterias y sus efectos sobre la circulación de la sangre. Y así se establecería una lista que podría ser, o al menos parecer, interminable.

§3. Una nueva farmacología

También la farmacología se vio afectada. En *De materia medica*, Dioscórides (siglo I) confiaba en la homeopatía y describía el uso médico de medio millar de plantas que se limitaban al tratamiento sintomático. Las primeras medicinas surgieron para combatir las epidemias: el mercurio para la sífilis, la quinina para la malaria, en tanto se abandonaba la terapéutica galénica basada en las purgas y sangrías, aplicadas de modo reiterado. La ya citada síntesis de la urea (1828) fue el primer paso en el desarrollo de los medicamentos de síntesis. La primera cátedra de Farmacología se creó en Dorpat (Tartu en la actualidad), en Estonia, y su titular, Rudolph Buchheim, fundó en 1847 el primer instituto de farmacología experimental de Europa. Le sucedió uno de sus discípulos, Oswald Schmiedeberg, que desempeñó la misma cátedra en Estrasburgo a partir de 1872, durante la época en que Alsacia fue parte del imperio alemán. Se le considera la figura más destacada en la formación de esta disciplina, a través de sus numerosos discípulos procedentes de todas partes del mundo; asimismo, contribuyó con un *Lehrbuch der Arneimittlehre (Compendio de farmacología; 1856)* en el que ordenaba los medicamentos por analogías químicas y farmacodinámicas.

Este desarrollo institucional estuvo apoyado por la quimioterapia sintética; esto es, la producción en el laboratorio de compuestos químicos que no existen de forma espontánea en la naturaleza. En 1832, Liebig obtuvo el cloral, aunque éste no fue utilizado hasta que en 1869 Oscar Liebreich demostró que al unirse con una molécula de agua tiene efectos hipnóticos y antiespasmódicos. Pero el gran medicamento producido en el siglo XIX fue la aspirina, el más difundido de los antipiréticos.

Emparentada con el ácido salicílico (que puede obtenerse de la corteza del sauce blanco, *Salix alba*), que ya citaba Dioscórides como analgésico y que Hermann Kolbe sintetizó en 1859, la aspirina está compuesta por el ácido acetilsalicílico, que sintetizó el químico francés Charles Frédéric Gerhardt en 1833. Aun así, el nuevo compuesto pasó desapercibido hasta que los laboratorios Bayer, en Elberfeld,

probaron sus efectos en animales, procediendo a continuación a realizar ensayos clínicos. El resultado fue un producto, la aspirina, que se comercializó a partir de 1899, año en que se hicieron públicas sus propiedades (como mitigar dolores o combatir inflamaciones en el reumatismo) en un libro de Heinrich Dreser titulado *Pharmakolisches über Aspirin*.

Otro producto temprano, y célebre, de la quimioterapia fue uno obtenido en 1910 por Paul Ehrlich, el salvarsán («arsénico que salva»), con el que se combatía eficazmente la sífilis. Una vez descubierto (1905) el agente causante de la sífilis venérea, el *Treponema pallidum*, se dedicó a intentar conseguir lo que metafóricamente denominó *magische Kügeln* («balas mágicas»). Así fue como obtuvo el salvarsán, que mejoró en 1912 con el neosalvarsán.

En realidad, esta aportación de Ehrlich hay que enmarcarla en el contexto del estudio de los anticuerpos (un término que introdujo el propio Ehrlich en 1891), las proteínas del sistema inmune que se producen para destruir moléculas invasoras que penetran en el organismo. El estudio de los anticuerpos comenzó en 1890 con los trabajos del bacteriólogo alemán Emil Adolf von Behring y de su colega japonés Shibasaburo Kitasato, que descubrieron los anticuerpos que protegen de la difteria y la toxina tetánica. De esta manera, quedó clara la existencia de un nuevo sistema, el sistema inmunológico, en el cuerpo humano.

Aunque fuesen el mismo tipo de remedios farmacéuticos que los anteriores, hay que mencionar también el empleo de productos químicos para mejorar la salud de las personas. Un ejemplo en este sentido lo ofrece el trabajo del médico y patólogo holandés Christiaan Eijkman. Tras producir experimentalmente una deficiencia alimentaria en animales (pollos y palomas), introdujo el concepto de «factores alimenticios esenciales» (básicamente lo que más tarde se denominarían «vitaminas»). En 1896, demostró que la sustancia (ahora conocida como vitamina B1) que protegía contra el beriberi se encontraba en la cáscara de los granos de arroz, precisamente la parte que se eliminaba cuando se «pulía» este producto (en 1885, un médico de la armada japonesa, Kanehiro Takaki, había comprobado que la frecuencia del beriberi dependía de la presencia de arroz descascarillado en la

dieta). Utilizando prisioneros de guerra en Java, realizó ensayos clínicos que confirmaron sus ideas y abrieron el camino hacia la ciencia de las vitaminas, camino que habría de recorrerse ya en el siglo XX (en 1928, por ejemplo, el húngaro Albert Szent-Gyorgy aisló la vitamina C, y la B₆ en 1934).

§4. Enfermedades infecciosas y teoría microbiana de la enfermedad

Las pandemias eran enfermedades infecciosas que se extendían a gran distancia y producían una gran mortalidad, debida en parte a la aparición de nuevos brotes. Las cifras de muertos son estimaciones más o menos fiables según la época de la historia en que se produjeron. La peste bubónica, por ejemplo, fue la causa de la mayoría de ellas. La plaga de Justiniano, la muerte negra en el siglo XIV, las de Milán y Londres en el siglo XVII, la de Marsella en el xviii y la de China de 1855 causaron gran mortalidad. No se conocían las causas que las producían ni había medios para combatirlas. Evitar las zonas pantanosas en las que pululaba una vida incomprensible (*miasmata*) fue el consejo que daba el polígrafo y militar romano Marco Terencio Varrón (116-27 a. C.). Además de las pandemias había enfermedades endémicas, que se revelaron infecciosas. La tuberculosis puede ser tan antigua como el hombre, el cólera llegó a Europa desde la India en el siglo IV a. C., la viruela acompañó a Hernán Cortés cuando llegó a México y parece que el tifus se manifestó con claridad por primera vez en 1546 en América. La explosión de la sífilis, tras el descubrimiento de América, no tenía explicación al ser invisible el agente que la producía. A falta de ésta, describieron la circunstancia en vez de la causa y atribuyeron la enfermedad al contagio asociado al acto sexual. Girolamo Fracastoro, que dio nombre a la enfermedad, distinguió en *De contagione et contagionis morbis* (1546) tres posibilidades: entre ellas el contagio provocado por las cosas inanimadas (fómites). Los únicos éxitos en el tratamiento no dieron lugar a una aplicación inmediata. En 1718, la mujer del embajador británico en Estambul, *lady* Mary Wortley Montagu (1689-1762), sometió a sus hijos a la variolización practicada por los médicos turcos. A final de siglo, Edward Jenner (1749-1823) descubrió que las mujeres que ordeñaban las vacas no contraían la viruela porque

sufrían una enfermedad más benévola. Las circunstancias del caso explican no sólo el limitado desinterés por el tema, sino también la carencia de recursos médicos para combatir estos males.

La idea del contagio permaneció olvidada durante siglos y, cuando Jakob Henle la recuperó en 1840 en su *Von den Miasmen und von den miasmatischcontagiosen Krankheiten* (*Sobre los miasmas y las enfermedades miasmático-contagiosas*), excluyó a los parásitos y a los miasmas, atribuyendo el origen de las enfermedades infecciosas a unos gérmenes de los que nada se sabía, que había que identificar, aislar y cultivar para, una vez inoculados, descubrir si producían la enfermedad. Recordemos, asimismo, las aportaciones de Ferdinand Cohn en su texto de 1872-1875, *Neue Untersuchungen über Bacterien* (*Nuevas investigaciones sobre las bacterias*), que con su clasificación en cocos, bacilos, vibriones, espirilos y espiroquetas introducía las bases de una taxonomía y morfología bacteriológicas.

No tan específica, pero no menos sugerente, fue la intuición de Ignaz Semmelweis (1818-1865), que al observar que la primera clínica del Hospital General de Viena, atendida por médicos, tenía más casos de infección que la segunda, a cargo de comadronas, descubrió en 1848 una de las causas de la infección de las heridas en la suciedad de las manos de aquéllos, que pasaban directamente de la disección al examen de las parturientes, lo que le llevó a proponer medidas antisépticas (el lavado de manos), explicando de esta manera las causas de la fiebre puerperal.

El descubrimiento de la acción de las bacterias requería de nuevos enfoques y métodos, como el cultivo en laboratorio; había que conservar esas bacterias en un medio favorable —habitualmente un líquido— al crecimiento y la reproducción al tiempo, y los primeros cultivos procedían de los tejidos y estaban compuestos por diferentes bacterias, dos opciones poco propicias para el desarrollo de la observación. Y en este punto hay que referirse a Louis Pasteur (1822-1895).

Aun sin detallar las motivaciones y resultados del conjunto de la obra pasteuriana, hay dos hechos que deben resaltarse: 1) fue un químico y físico que terminó ocupándose de problemas médicos, y 2) no eludió las investigaciones aplicadas. En realidad, ambos aspectos de su carrera están íntimamente relacionados: por un lado,

estaban sus conocimientos químicos y físicos; por otro, no era ajeno al mundo que le rodeaba, al mundo, por ejemplo, de la industria de la seda o de la cerveza, el mundo agrícola o el de las enfermedades. Ambos rasgos le fueron llevando, en una secuencia que a veces uno está tentado de considerar inevitable, de un tema de investigación a otro.



Louis Pasteur

Así, sus estudios sobre disimetría molecular (diferencias en la orientación del plano de polarización de la luz, al pasar ésta por diferentes sustancias) le condujeron a ocuparse del alcohol amílico, activo también ópticamente. Ahora bien, resulta que el alcohol amílico desempeña un papel importante en la fermentación láctica. Se abrió de esta manera la puerta a las investigaciones de Pasteur sobre fermentación, en las que demostró que ésta era resultado de la acción de organismos vivos

microscópicos; que no se producía cuando se excluían o aniquilaban (sometiéndolos, por ejemplo, a la acción del calor, la forma más primitiva de un proceso que, tras ser perfeccionado, recibió en honor suyo el nombre de «pasteurización»). Al llegar a semejantes conclusiones, Pasteur se había adentrado, lo quisiese o no, en una cuestión tan básica como de larga historia: la de si era posible la generación espontánea; esto es, si seres vivos pueden surgir de sustancias inanimadas. Como vimos en el capítulo 18, Pasteur puso punto final de manera definitiva a esta cuestión, demostrando, de manera más precisa que Redi, que la tesis de la generación espontánea no era cierta.

Establecido este punto, resultaba razonable pensar en aplicar el nuevo planteamiento al origen de enfermedades. Semejante convicción fue la que llevó finalmente a Pasteur a la investigación médica, que inició con el estudio (1877) del ántrax o carbunco, cuya causa asoció también con un microorganismo, la «bacteridia».

Y en este punto entra en escena Robert Koch (1843-1910), que se distinguió en el problema de desarrollar técnicas para estudiar microbios en cultivos. En 1879, publicó uno de sus trabajos fundamentales, «La etiología de las enfermedades traumáticas infecciosas», en el que se encuentran los postulados que explican cómo probar que una bacteria determinada produce una condición específica: 1) el agente patógeno debe estar presente en cada caso de la enfermedad; 2) el agente debe ser aislado del cuerpo en un cultivo puro a partir de las lesiones de la enfermedad; 3) el agente debe producir la enfermedad en un animal susceptible de ser inoculado; y 4) el agente podrá aislarse de nuevo a partir de las lesiones de los animales usados en el experimento.

Tras estas aportaciones fue designado por la Oficina Imperial de la Salud de Berlín para asesorar en cuestiones de salud e higiene pública. En 1882, después de haber desarrollado métodos sencillos y originales para crecer y examinar cultivos bacterianos, anunciaba en la Sociedad de Fisiología de Berlín su descubrimiento del bacilo de la tuberculosis, una enfermedad — cuya primera denominación fue «tisis», «consunción» después— responsable entonces de la muerte de millones de

personas cada año (sólo en Prusia la mortalidad ascendía en 1882 a 300 por cada 100.000 habitantes). Un año más tarde, al sumarse a una expedición francesa a Alejandría, consiguió aislar el bacilo del cólera (o vibrión colérico). En 1890, el X Congreso Internacional de Medicina se celebró en Berlín, y Koch, presionado por el Gobierno, anunció el descubrimiento de la tuberculina, una sustancia que inhibía el desarrollo del bacilo, no una vacuna. Su principal virtud era la capacidad de distinguir a los afectados por la enfermedad de los sanos. La vacuna más eficiente, aún en uso, fue descubierta en 1923 por Albert Calmette (1863-1933) y Camille Guérin.

En sus trabajos, Koch empleó técnicas de observación avanzadas. Utilizó una placa como soporte de una base orgánica: finas rodajas de patata sobre las que disponía las células de la especie deseada, que al reproducirse daban lugar a cultivos, visibles a simple vista, compuestos por millones de individuos. Recurrió a placas de cristal recubiertas con una emulsión, y más adelante gelatina y agar, que aportaban nutrientes al cultivo. Naturalmente, fueron también muy importantes para él los microscopios, beneficiándose de los avances realizados en este campo por Ernst Abbe. Provisto con el nuevo instrumento, Koch aisló en 1882 el bacilo de la tuberculosis.

Gracias a las investigaciones de Pasteur y de Koch, y de los que vinieron tras ellos, se llegó a conocer con gran precisión científica la relación causal entre microorganismos y enfermedades infecciosas. Surgió así un modo nuevo de concebir la enfermedad: la teoría microbiana de algunas enfermedades. Estrechamente asociado a esta visión, aunque con antecedentes muy antiguos, se encuentra el desarrollo decimonónico de vacunas, una práctica que —ya lo señalamos— se usaba, de manera limitada, desde hacía tiempo y que Edward Jenner difundió en Inglaterra a partir de 1798. En 1880, tras aislar el microbio responsable del cólera de las gallinas, Pasteur consiguió disminuir su virulencia siguiendo la técnica de Jenner; esto es, inyectando en dichos animales microbios debilitados. Estimulado por los resultados favorables que obtenía, aplicó el principio de la debilitación de los gérmenes para preparar vacunas contra la rabia,

enfermedad infecciosa mortal que afecta a los perros, pero que también pueden contraer —mediante mordedura de éstos— las personas. Sus primeros estudios en este campo comenzaron en diciembre de 1880, cuando un veterinario le llevó dos perros rabiosos y le pidió su opinión. Sólo había experimentado con perros cuando, en 1885, le llevaron un niño de nueve años, Joseph Meister, que había sido mordido por un perro rabioso. A pesar de no ser médico, Pasteur aceptó el desafío y experimentó la vacuna con éxito en el niño. Había nacido la vacunación moderna; la única gran modificación que se produciría posteriormente fue la introducción de vacunas obtenidas por ingeniería genética, que se inició en 1983 y cuyo primer producto comercializado fue la vacuna contra la hepatitis B, en 1986.

De los nuevos medicamentos que se obtuvieron antes de 1935, el que más admiración produjo fue la antitoxina contra la difteria, desarrollada (beneficiándose de trabajos previos de Émile Roux y Alexandre Yersin, y de otros realizados en el Instituto Pasteur) en el laboratorio de Koch en Berlín por Emil Adolf von Behring y su colaborador, el japonés Shibasaburo Kitasato. Encontraron que el suero de un caballo inmunizaba contra la citada enfermedad, que producía 50.000 muertes anuales en el Imperio alemán, aplicando este método por primera vez en 1891 a un niño que la padecía. El procedimiento (sueroterapia) era igualmente útil para el tétanos.

Los éxitos en la prevención de las enfermedades dieron lugar a una nueva especialidad, la inmunología, basada en la idea de dotar al organismo de los medios para hacerle frente mediante la creación de anticuerpos. El primer hallazgo se debe a un zoólogo ruso, Iliá Méchnikov, que en 1884 descubrió la fagocitosis, la actividad de los fagocitos, células de la sangre que se alimentaban con las bacterias, para lo cual utilizó la infección del hongo *Monospora bicuspidata* de la pulga acuática *Daphnia magna*.

§5. Anestésicos y asepsia

El desarrollo de la cirugía estaba limitado por el dolor producido por la intervención. El primer producto anestésico fue el óxido nitroso, un gas en estado

natural, inhalado por el químico Humphry Davy en 1795. Describió sus efectos señalando que producía relajación de los músculos y una propensión a la risa, de ahí que recibiese el nombre de «gas hilarante». Medio siglo después, en diciembre de 1844, el dentista estadounidense Horace Wells utilizó óxido nitroso como anestésico para extraerse él mismo una de sus muelas. El 16 de octubre de 1846, John Collins Warren, ayudado como anestesista por el dentista William Thomas Morton, realizó en el Hospital General de Massachusetts de Boston la primera operación con éter, tras la cual pronunció una frase célebre: «Señores, esto no es superchería». Y el 19 de enero de 1847, James Young Simpson utilizó, en Edimburgo, por primera vez, cloroformo para aliviar los dolores. Pronto estas novedades se difundieron por Europa, aplicándose incluso a la reina Victoria en 1853 y 1857.

No hay que olvidar tampoco al célebre médico londinense John Snow, que en 1854 demostró con claridad, aunque con argumentos meramente circunstanciales, que todos los casos de cólera surgidos en un distrito de Londres podían ser atribuidos a una sola fuente contaminada de agua potable (anunció sus ideas en un libro anterior: *On the Mode of Communication of Cholera [Sobre la forma de transmisión del cólera]*). Su logro entra dentro de lo que terminaría denominándose «medicina preventiva».

Ahora bien, todo lo anterior no era suficiente —las muertes en los quirófanos continuaban proliferando—, sobre todo porque todavía se desconocía la razón de que las medidas antisépticas resultaran tan beneficiosas. La anestesia, al inhibir el dolor, facilitaba la acción del cirujano, pero se necesitaban medios (antisepsia) para destruir los gérmenes infecciosos que podían poner al paciente en peligro. Este problema comenzaría a resolverlo el médico inglés Joseph Lister (1827-1912).

Conocedor de los estudios que Pasteur llevó a cabo durante la primera mitad de la década de 1860 sobre la fermentación y de su descubrimiento de que el aire puede transportar bacterias que producen infecciones en heridas, pero no disponibles todavía los trabajos de Koch sobre el papel de las bacterias como fuente de infección en las heridas, Lister convirtió la gangrena de los miembros en el primer

ejemplo de fermentación patológica en el hombre, estableciendo así un vínculo entre la putrefacción de la carne necrosada y los gérmenes externos descubiertos por el francés. Con semejante base, Lister encontró un eficaz remedio contra la gangrena: experimentó con éxito con ácido fénico, pulverizándolo en la sala de operaciones y aplicando curas de pomada fenicada, con el fin de destruir los microorganismos que infectaban el campo operatorio (su primer gran logro tuvo lugar en agosto de 1865, en la operación de una fractura compuesta).

Poco después, en 1866, Ernst von Bergmann empleó por primera vez la técnica de Lister, esterilizando por vapor los guantes y ropas del cirujano al igual que las de sus ayudantes y los instrumentos empleados.

§6. Antibióticos

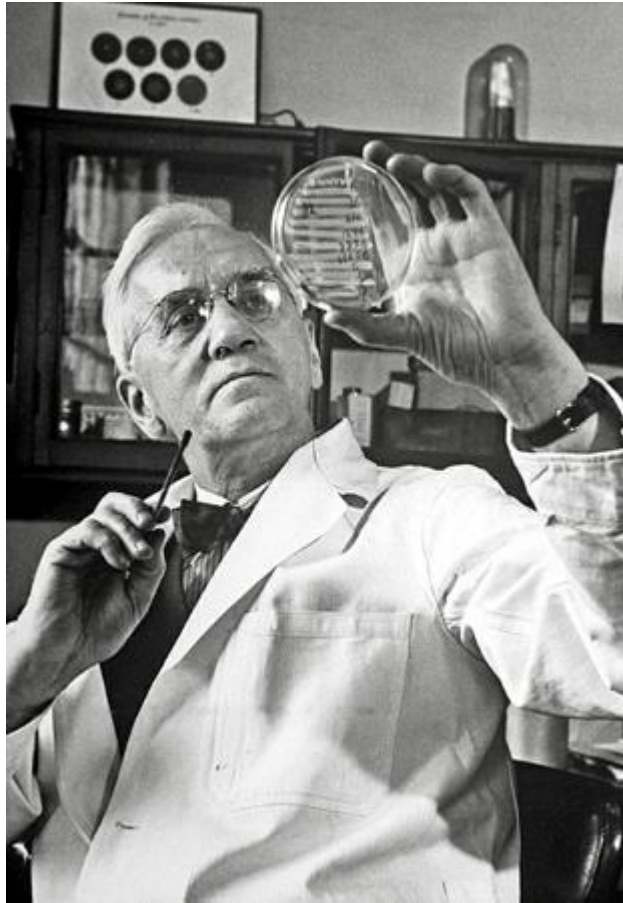
Un medicamento descubierto en el siglo XX merece nuestra atención: la penicilina, el primer antibiótico. Millones de vidas se han salvado gracias a su empleo. El responsable de su hallazgo fue un bacteriólogo escocés, Alexander Fleming (1881-1955), que trabajaba en el Departamento de Inoculación del St. Mary's Hospital de Londres. Ahora bien, el descubrimiento fue fortuito: siguiendo su costumbre de no descartar inmediatamente los cultivos que realizaba en placas Petri, conservándolos más allá de lo que era en principio razonable, y estudiándolos de nuevo antes de destruirlos, en septiembre de 1928 encontró que en una placa en la que había estado cultivando una bacteria, *Staphylococcus aureus*, había crecido también un hongo en un lugar en donde se había inhibido el crecimiento de aquella (el hongo apareció porque, en las proximidades, otros científicos del laboratorio estaban estudiando su efecto en pacientes de asma). La conclusión inevitable de que el *Staphylococcus* no continuase desarrollándose era que el hongo en cuestión —identificado como el *Penicillium notatum*— producía una sustancia que originaba su muerte. Sin embargo, de entrada, Fleming no se dio cuenta de la importancia de su hallazgo; pensaba que las posibilidades de la acción antibacteriana de la sustancia que producía el moho *Penicillium* que había encontrado se limitaban a lavados o pomadas aplicadas externamente, no internamente, al paciente. Hubo que esperar

hasta el 24 de agosto de 1940, ya en plena Segunda Guerra Mundial, para que varios investigadores de la Dunn School de Patología de Oxford, entre los que destacan el patólogo australiano Howard Walter Florey (1898-1968), que dirigía el grupo, y el joven bioquímico Ernst Chain (1906-1979), un refugiado de la Alemania nazi, publicaran, junto a otros colaboradores, un artículo histórico en el que presentaban investigaciones con ratones que demostraban que la penicilina era, con mucho, el agente químico-terapéutico más efectivo producido hasta entonces. El siguiente paso fue probar con humanos, pero ésta era una tarea complicada de llevar adelante, dadas las dificultades existentes para obtener suficiente penicilina. Un avance importante tuvo lugar en enero de 1942, cuando Florey administró a quince pacientes, por vía intravenosa, penicilina preparada con la ayuda de Imperial Chemical Industries. Midiendo los niveles de penicilina en la sangre y estudiando los efectos clínicos, estableció las dosis adecuadas para diversos tratamientos. Aun así, en medio de la guerra, con evidencias firmes pero no demasiado abundantes, no existía en Gran Bretaña ninguna compañía farmacéutica capaz de dedicar los recursos suficientes para producir cantidades industriales de penicilina, ni dispuesta a ello. Por este motivo, Florey solicitó la ayuda de la Fundación Rockefeller, en Nueva York, que de hecho ya apoyaba sus investigaciones. Con su colaboración y la del destacado farmacólogo estadounidense Alfred Newton Richards, consiguió que algunas compañías farmacéuticas (Merck, Pfizer y Squibb) arriesgasen los recursos necesarios. En 1944 ya se dispuso de cantidades suficientes de penicilina para tratar a heridos de guerra en África del Norte y Europa, al igual que infecciones graves de civiles.

A partir de entonces, la penicilina desencadenó un gran entusiasmo social: los resultados que producía eran espectaculares (contraindicaciones, como la sensibilización ante ella, no serían descubiertas hasta mucho después): en la década de 1950, era la prescripción médica más importante; en Estados Unidos, por ejemplo, representaba el 10 % del total de los medicamentos recetados por los facultativos.

No es, en consecuencia, sorprendente que se buscasen otros medicamentos que

cumplieran funciones parecidas. Éstos no tardaron en llegar: primero fue la estreptomicina (1944), aislada por Albert Schatz, que trabajaba en el laboratorio del microbiólogo estadounidense de origen ruso Selman Waksman —quien acuñó el término «antibiótico»—, a quien injustamente se le adjudicó todo el mérito (recibió el Premio Nobel de Medicina en 1952).



Alexander Flemming

Más tarde llegarían otros antibióticos, como la aureomicina, desarrollada por los laboratorios Lederle en 1948, el cloramfenicol (Parke-Davis, 1949), el primer antibiótico completamente sintético, capaz de luchar contra la fiebre tifoidea, o la terramicina (Pfizer, 1950), abriéndose así un nuevo universo médico del que se beneficiaron cientos de millones de personas, muchas de las cuales seguramente habrían muerto sin el auxilio que recibieron de esos antibióticos. De hecho, el éxito

de los antibióticos ha sido tal que por diversas causas —por ejemplo, comenzar tratamientos con ellos y abandonarlos por iniciativa del paciente cuando éste se siente mejor— han aparecido cepas bacterianas resistentes a ellos, con el consiguiente repunte de algunas enfermedades (el caso, por ejemplo, de la tuberculosis).

§7. Enfermedades mentales

Los trastornos del comportamiento se atribuían en Grecia al desequilibrio de los humores: el exceso de bilis amarilla se manifestaba en las manías, y el de la negra conducía a la depresión (melancolía). Las diferentes doctrinas religiosas asumieron la posibilidad de la presencia de los malos espíritus (diablos) para explicar las alteraciones de la conducta, y utilizaban el exorcismo para expulsarlos: «Cuando el espíritu de Dios se apoderaba de Saúl, David tomaba el arpa, la tañía en su mano y Saúl sentía alivio y bienestar, pues se retiraba de él el espíritu malo» (Samuel 1, 16). Cristo dio a sus discípulos el poder de curar y expulsar los malos espíritus (Mateo 1, 10). A falta de medios más eficaces, musulmanes y cristianos acudieron a la reclusión en hospitales y en caso de necesidad al aislamiento y los grilletes. Los ilustrados promovieron el tratamiento sintomático con la administración de belladona, acónito y opio. Vincenzo Chiarugi, director médico del Hospital de Santa Dorotea de Florencia entre 1785 y 1788, revisó en 1789 el reglamento para eliminar las prácticas lesivas, medida que también adoptó Philipp Pinel en la Salpêtrière. Escribieron sendos tratados: *Della Pazzia in genere e inspezie* (1793-1794) y *Traité medico-philosophique sur l'aliénation mentale ou la manie* (1801). En este último, Pinel definió la enfermedad mental como aquella que no se podía explicar por una causa orgánica, y en 1808, un médico alemán, J. C. Rell, creó la palabra «psiquiatría» para describir la especialidad.

La construcción científica de las enfermedades mentales no comenzó hasta fines del siglo XIX. Dos médicos, Emil Kraepelin (1856-1926) y Sigmund Freud (1856-1939), nacidos el mismo año, con unos meses de diferencia, coincidieron en su dedicación a la patología de la mente. Más allá de estas casualidades, cada uno

orientó su investigación en una línea independiente, que tuvo su reflejo en la diferencia entre la psiquiatría y el psicoanálisis.

Seguramente la contribución más destacada de Kraepelin consistió en elaborar, sobre la base de gran número de historias clínicas, una clasificación de las enfermedades en función de los síndromes, un conjunto de caracteres asociados. Identificó dos formas diferentes de la psicosis: la maniaco-depresiva y la *dementia precox*, cuyo nombre modificó el psiquiatra suizo Eugen Bleuer, denominándola *schizophrenias* («esquizofrenia», del griego *schizein*, «dividir», «escindir», «romper», y *phren*, «entendimiento», «razón», «mente»). A su vez, Kraepelin cambió el nombre de la demencia presenil por «enfermedad de Alzheimer», en homenaje a su colega Alois Alzheimer (1864-1915). La psiquiatría se caracteriza por buscar la causa orgánica de la enfermedad mental, y más que curación persigue limitar mediante fármacos los efectos de la enfermedad. El gran desarrollo experimentado por la farmacopea después de la Segunda Guerra Mundial contribuyó al predominio actual de la psiquiatría en el tratamiento de las enfermedades mentales.

Mientras que un paciente común describe los síntomas de su enfermedad, el enfermo mental puede ser incapaz de hacerlo y cuando lo hace acostumbra a ocultar información fundamental. La única vía que ofrecía resultados apreciables en el diagnóstico y la terapia era acudir a la hipnosis, que había atraído el interés de algunos médicos después del espectáculo que habían ofrecido el médico vienés Franz Anton Mesmer (1734-1815) y sus seguidores con la teoría (mesmerismo) de la existencia de un invisible magnetismo animal cuya cantidad y distribución en un cuerpo era responsable de su salud o enfermedad. Fue Jean-Martin Charcot (1825-1893), profesor de la Universidad de París, que en 1862 se hizo cargo del servicio neurológico del Hospital de la Salpêtrière, quien utilizó el hipnotismo para diagnosticar las causas de la histeria. Consideró que los síntomas del trastorno mental coincidían con unos estados que describió en las pacientes sometidas a hipnosis: catalepsia, el estado en el que respondían a las sugerencias; letargia, en el que no respondían; y sonambulismo, en el que respondían a sus preguntas. Las

sesiones clínicas eran espectaculares por la abolición de los síntomas en estado hipnótico, un procedimiento aplicable sólo a los pacientes de histeria, los únicos que respondían a la hipnosis. En sus *Leçons sur les maladies du système nerveux* (*Lecciones sobre las enfermedades del sistema nervioso*; 1882) explicó que los síntomas histéricos se debían a un *shock* traumático que provocaba la disociación de la conciencia y cuyo recuerdo permanecía inconsciente o subconsciente.

En 1866, Ambroise Agustin Liébeault creó en Nancy una escuela de psicoterapia que practicaba la sugestión hipnótica, a la que se sumó en 1871, al pasar Estrasburgo al Imperio alemán tras la guerra francoprusiana, Hippolite-Marie Bernheim, que acusó a Charcot de provocar la histeria de los pacientes con sus sugerencias y defendió el carácter terapéutico de la hipnosis.

Por su parte, Sigmund Freud concibió los trastornos de la conducta como enfermedades no orgánicas, puros trastornos mentales. La única posibilidad conocida para diagnosticarlas dependía de que el paciente describiese los síntomas y el médico pudiese verificar la exactitud de su relato. Sabedor de las posibilidades que abría la hipnosis, Freud asistió en París a las clases y sesiones clínicas de Charcot durante el curso 1885-1886, viajando en 1889 a Nancy para seguir las exposiciones de Bernheim, el mayor crítico de la escuela de París, más preocupado por los efectos del tratamiento que por el conocimiento que podía ofrecer. Antes de visitar a Bernheim, en 1886 Freud había abierto consulta en Viena como neurólogo, dedicándose al análisis funcional de la afasia y asociándose con Joseph Breuer en el tratamiento de la histeria. En los diez años siguientes utilizaron la hipnosis como vía de acceso a la mente de los pacientes. En estado hipnótico preguntaban a aquéllos sobre las causas de sus síntomas, para provocar así una descarga emocional, algo que les descubrió la existencia de traumas psíquicos anteriores, rechazados por la conciencia. Al describir al paciente el origen del mal, cesaban los síntomas. Es lo que Ana O. (su nombre real era Bertha Pappenheim), la primera de las pacientes de Freud, denominó «curación por la palabra», que caracterizaría al psicoanálisis. En 1895, Freud y Breuer publicaron los *Studien über Hysterie* (*Estudios sobre la histeria*), una obra compartida más que una colaboración, cuyo

núcleo está formado por cuatro historias clínicas, que completaron con un par de capítulos comunes. De esa época es la «teoría del rechazo», según la cual la manifestación de un deseo inconveniente provoca el rechazo de la conciencia y el desplazamiento del deseo más allá de ella. El deseo frustrado se manifiesta en forma de síntomas que enmascaran la realidad.

A partir de esta fecha se produjo un rápido alejamiento entre ambos debido a la reticencia de Breuer ante la importancia que la sexualidad tenía para Freud, quien utilizó sus sueños para autoanalizarse, al tiempo que sustituía la hipnosis por la libre asociación de ideas. Eran dos vías de acceso a la conciencia más eficaces que la anterior. El «psicoanálisis», nombre que Freud introdujo, se ritualiza, el paciente se tiende en un sofá y cuenta cuanto se le ocurre, y el analista se sienta detrás para no interferir con su presencia el curso del relato, salvo en momentos concretos, en los que se le requiere más información. El descubrimiento de la sexualidad infantil, la atracción por la madre y el alejamiento y temor del padre, lo encontró Freud descrito con todo detalle en la tragedia de Sófocles *Edipo rey*, y en su honor dio su nombre al «complejo de Edipo».

Para Freud, el sueño era el guardián del que duerme, le protege contra los estímulos interiores, mediante la transformación del deseo en imágenes asumibles. El examen detallado de esas imágenes conduce a la interpretación, la descripción de lo que los sueños ocultan. Otras manifestaciones de la conducta, como los actos fallidos o los olvidos, fueron recuperadas como fuentes de información, que expuso en un libro publicado en 1901, *Zur Psychopathologie des Alltagsleben (Psicopatología de la vida cotidiana; 1901)*. La explicación del trauma original suele ir acompañada de la desaparición de los síntomas o de parte de ellos.

Antes de la aparición de la *Psicopatología de la vida cotidiana*, Freud publicó el que generalmente se considera su gran libro: *Die Traumdeutung (La interpretación de los sueños; 1900)*, con el que quedó establecido definitivamente el psicoanálisis. Sin embargo, pasó prácticamente inadvertido: se imprimieron 600 ejemplares, de los que se vendieron 123 en las primeras seis semanas, y 228 en los años siguientes, un detalle que habla por sí solo acerca de las dificultades iniciales que tuvo el

psicoanálisis para su difusión.

En 1909, Freud se desplazó con alguno de sus colegas a Estados Unidos, donde el psicoanálisis había conocido un notable desarrollo. La teoría de la sexualidad infantil fue el tema preferente de sus publicaciones de 1905 a 1913. Fue el momento en el que introdujo el concepto de «pulsión» para designar la fuerza psíquica destinada a realizar un fin, y distinguió entre la sexual y la tendente a la autoconservación (pulsión del yo). A partir de 1920, Freud formuló una nueva teoría de las pulsiones al contraponer la pulsión de la vida (eros) y la de la muerte (*tanatos*) en *Jenseits des Lustprinzips (Más allá del principio del placer; 1920)*, y redefinió en 1923 el sistema psíquico con tres conceptos: el ello (*Id*), el yo (*Ego*) y el superyó (Superego), con los que distinguió tres componentes estructurales en la personalidad del individuo. El ello es la parte de la mente en donde se localiza tanto el instinto sexual como la censura de los recuerdos, el principio de realidad. El yo, en su mayor parte consciente, busca evitar las tensiones con el mundo mediante el uso de mecanismos de defensa que se encuentran en la parte inconsciente. El superyó, que se forma desde el nacimiento hasta los cinco años, es el conjunto de normas sociales que se interioriza a partir del momento en que se supera el complejo de Edipo, para escapar al complejo de castración. La relación armónica de los tres elementos caracteriza la normalidad del individuo, en tanto que la insatisfacción de los impulsos del ello y la trasgresión de las normas del superego provocan la represión del ego, que busca conciliar los términos del conflicto. El impulso frustrado sobrevive en el inconsciente y se manifiesta a través de los sueños, los actos fallidos y las enfermedades mentales. Las neurosis afectan a la percepción del propio sujeto y al nivel de insatisfacción que obtiene. La normalidad incluye una cierta insatisfacción. Las psicosis son más graves y afectan seriamente a las relaciones con el medio.

Es preciso señalar que la curación, tanto en psiquiatría como en psicoanálisis, no se confunde con la restauración de la normalidad orgánica y fisiológica. Se limita a reducir los síntomas. Dentro de estos límites la complejidad del proceso, reflejada en la dedicación del analista y la duración del tratamiento, ha limitado el recurso al

análisis en tanto el desarrollo de los fármacos ha mejorado su eficacia.

Mencionemos por último que las ideas de Freud, que con el paso del tiempo fueron mostrando serias deficiencias que, no obstante, no pueden hacer olvidar su carácter determinante para convertir el subconsciente en objeto de estudio científico, inspiraron contribuciones como las de Jean Piaget (1896-1980), quien extendió los enfoques psicoanalíticos mientras investigaba los orígenes en los niños de los conceptos de tiempo, espacio, causalidad y objetividad. Por el contrario, el behaviorismo, un movimiento psicológico fundado por el norteamericano John Watson (1878-1958) y desarrollado por otros, notablemente Burrhus Frederic Skinner (1904-1990), negó cualquier papel central a las emociones o sentimientos, intentado en su lugar comprender el comportamiento humano (y animal) como resultado de actos reflejos, hábitos y respuestas aprendidas ante ciertos estímulos, un enfoque al que dio base fisiológica el científico ruso Ivan Pavlov (1849-1936) con sus famosos trabajos sobre lo que denominó «reflejos condicionados», para los que utilizó perros.

§8. Trasplantes

Medicamentos, cirugías, psicoanálisis... son formas de combatir desequilibrios orgánicos o psíquicos del cuerpo humano. Pero, aunque existen ejemplos previos (por ejemplo, podrían citarse los injertos de piel realizados en el siglo XVIII), el siglo XX alumbró otro mecanismo, más radical, para mejorar la condición humana: el trasplante de órganos.

Para que los trasplantes pudiesen tener éxito, fue preciso disponer de una serie de técnicas médicas. En primer lugar, profundizar en el conocimiento de la sangre, para, entre otras cosas, poder realizar transfusiones. El gran avance en este campo fue el que llevó a cabo un médico, Karl Landsteiner, que en 1901 identificó los tres tipos sanguíneos, *A*, *B* y *O*, y otros tres en 1930, *M*, *N* y *P*. El primer banco de sangre se creó en Leningrado (1932) y el siguiente en Chicago, donde surgió el nombre. La transfusión de sangre permitió superar las dificultades asociadas a la operación. Importantes también fueron los trabajos que realizó en 1943 Peter

Medewar sobre los mecanismos inmunológicos mediante los cuales el organismo receptor destruye el tejido injertado, y los de Jean Dausset sobre la histocompatibilidad humana. También, como veremos, resultó fundamental disponer de inmunosupresores. Se necesitó, en definitiva, que cirugía e inmunología se diesen la mano.

Los trasplantes de piel fueron la primera operación de este género; se realizaban con tejido sano del propio paciente para evitar el rechazo. El primer intento de trasplante de órganos de un donante humano muerto fue el realizado el 3 de abril de 1933 por un cirujano ucraniano, Yu Voronoy, que trasplantó el riñón de un cadáver a una joven aquejada de insuficiencia renal. El intento, no obstante, fracasó, ya que la receptora falleció al día siguiente, al rechazar su cuerpo el nuevo órgano. Finalmente, el 23 de diciembre de 1954 Joseph Murray, del Hospital Peter Bent Brigham de Boston, trasplantó un riñón entre dos personas vivas: de un gemelo a su hermano. Fue un éxito total y duradero. No tardarían demasiado en convertirse en operaciones rutinarias.

En la década de 1960 se iniciaron los trasplantes pulmonares. En junio de 1963, en Jackson (Estados Unidos), James Hardy trasplantó los pulmones de una persona fallecida a un paciente que sufría de cáncer pulmonar, pero éste sobrevivió solamente 18 días, debido a un fallo de los riñones. Aquel mismo año, Thomas Starzl intentó, en Denver, un trasplante de hígado, pero no tuvo éxito. Hubo que esperar hasta 1967 (Richard Lillehei y William Kelly; Minnesota). Pero cuando los trasplantes llegaron a las portadas de los periódicos, cuando el mundo sintió que se había traspasado una nueva frontera, fue el 3 de diciembre de 1967, el día en que el cirujano sudafricano Christiaan Barnard, del Hospital Groote Schuur, en Ciudad del Cabo, trasplantó un corazón procedente de una mujer de 24 años, fallecida en un accidente de circulación, a un inmigrante lituano de 55 años, Louis Washkansky, que había sufrido una serie de infartos durante los siete años precedentes y cuyo corazón estaba en tal estado que los cardiólogos estimaban que moriría en unas pocas semanas.

Washkansky sobrevivió 13 días, falleciendo de neumonía: su sistema

inmunológico, suprimido con medicamentos y radiaciones para que no atacase a su nuevo corazón, había sido incapaz de luchar contra la infección; sin embargo, un estudio *postmortem* reveló que el corazón mantuvo su función normal hasta el último momento, sin que se hallaran signos de rechazo del órgano. El 2 de enero del año siguiente, Barnard realizó un nuevo trasplante de corazón, a un dentista de 58 años, Philip Blaiberg, con mayor éxito, ya que el paciente sobrevivió 594 días, hasta que su organismo rechazó el corazón trasplantado. Pronto, los trasplantes de corazón se extendieron por todo el mundo: en los cuatro años siguientes, 56 equipos de cirujanos llevaron a cabo un total de 180 trasplantes (100 de ellos el primer año). No obstante, muchos hospitales abandonaron pronto la práctica, debido a los problemas de rechazo inmunológico que producían los órganos recibidos. La solución a este problema llegó en 1972, cuando un investigador del laboratorio Sandoz de Basilea (Suiza), Jean Borel, descubrió en las altiplanicies de Noruega un antibiótico, la ciclosporina, que aisló de un hongo denominado *Tolypocladium inflatum* que posee una potente acción inmunosupresora, pudiendo anular la respuesta defensiva del organismo que causa el rechazo del corazón trasplantado.

Ahora bien, por mucho que sea el éxito alcanzado en la realización de trasplantes de corazón, es evidente que se trata de una práctica que no puede ser muy frecuente, al necesitar de donantes. Y si tenemos en cuenta que el tipo de enfermedades que más han aumentado, al menos en los países desarrollados, los países de la abundancia, han sido las cardiovasculares, entonces se hace evidente la necesidad de contar con métodos alternativos y también paliativos. Un primer paso importante en la lucha contra los infartos, el problema cardiovascular más grave (o más frecuente), fue la introducción de los marcapasos, dispositivos alimentados por baterías que emiten pulsos eléctricos que hacen latir al corazón a un ritmo regular y constante. En 1952, Paul Maurice Zoll, un cardiólogo de Boston, presentó un aparato que combinaba el control del electrocardiograma del enfermo y un generador de pulsos, y que fabricó en Estados Unidos la empresa Electrodyne. No obstante, este aparato era muy molesto: se pegaba al pecho y funcionaba emitiendo

pulsos a través de los músculos pectorales, con el resultado de que se producían quemaduras en la piel del paciente después de uno o dos días. Con la invención del transistor fue posible construir marcapasos más pequeños y, por tanto, susceptibles de ser implantados. En 1957, el ingeniero Earl Bakken, de la empresa Medtronic (Minneapolis, Estados Unidos), avanzó en esta dirección fabricando un marcapasos con pilas de mercurio, y el 8 de octubre de 1958 un equipo sueco dirigido por el cirujano cardiovascular Áke Senning realizó el primer implante de un marcapasos a un ser humano, a Arne Larsson, de 43 años, utilizando el dispositivo diseñado por el ingeniero Rune Elmquist. Es importante señalar no sólo que el aparato falló a las tres horas de su implantación, siendo sustituido por otro que duró dos días (Larsson falleció en 2001 tras haber necesitado 22 marcapasos distintos a lo largo de su vida), sino también que no se trataba de un marcapasos completamente interno, al depender de fuentes externas, con lo que el receptor del aparato tenía cables que atravesaban su piel; de hecho, durante algún tiempo los pacientes continuaron llevando elementos externos sujetos al cinturón, con baterías de mercurio de duración muy limitada.

Pero el extraordinario progreso tecnológico que se produjo a lo largo de la segunda mitad del siglo XX condujo al diseño y fabricación de marcapasos con tamaño y peso mucho más reducido, que se implantan debajo de la piel del tórax, introduciendo el cable conductor hasta la punta del corazón a través de la vena central. El primer marcapasos de implantación totalmente interna se utilizó en 1960: contenía una batería de mercurio con carga útil de un año de duración; la sustitución de las baterías de mercurio por otras fabricadas con litio permitió que el marcapasos pudiera funcionar normalmente de ocho a diez años.

Otro avance importante fue el desfibrilador automático implantable, un aparato que se introduce debajo de la piel del tórax o del abdomen del paciente y cuyos cables se conectan al corazón. Se trata de un dispositivo electrónico que vigila constantemente el ritmo cardiaco del sujeto que lo porta, y que al detectar una arritmia ventricular grave o una parada efectúa una descarga eléctrica de bajo voltaje para restaurar el ritmo cardiaco normal. Si esta primera descarga no logra

corregir el problema, realiza otra pero esta vez de alto voltaje, para poner el corazón de nuevo a funcionar. Desde que el doctor Mirowski implantase en 1980, en Estados Unidos, el primer desfibrilador automático, el número de estos implantes ha aumentado exponencialmente en todo el mundo.

Y, por supuesto, hay muchos otros desarrollos, en general aún no completamente establecidos, en el dominio de «lo implantable», como el corazón artificial, el órgano central del andamiaje humano. El futuro, en definitiva, dirá hasta dónde llega la medicina de trasplantes, a la que se sumará, en lo que a mejorar el cuerpo humano se refiere, la ingeniería genética.

FIN