

Reseña

En este segundo volumen de la Historia de la Ciencia se presenta una exposición de la evolución de las ideas sobre el método científico y las críticas de los principios fundamentales del sistema del siglo XIII realizadas desde finales del siglo XII al XV, lo que preparó el camino para cambios más radicales en los siglos XVI y XVII.

Índice

[Agradecimientos](#)

1. [El método científico y los progresos de la Física al final de la Edad Media](#)
2. [La revolución del pensamiento científico en los siglos XVI y XVII](#)

[Láminas](#)

[Bibliografía](#)

Agradecimientos

Agradezco la aportación de fotografías para las ilustraciones: al bibliotecario de la Universidad de Cambridge (fig. 5 y láminas 4, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 20, 21, 23 *a* y *b*); al director del British Museum, Londres (fig. 3); al bibliotecario de la Bodley, Oxford (fig. 4 y láminas 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 15, 18, 22). Prestaron clichés para las ilustraciones los señores William Heinemann Ltd. (lámina 19).

Capítulo 1

El método científico y progresos de la física al final de la Edad Media

Contenido:

- 1.1 *El método científico de los escolásticos tardíos*
- 1.2 *La materia y el espacio en la física medieval tardía*
- 1.3 *Dinámica: terrestre y celeste*
- 1.4 *La física matemática al final de la Edad Media*
- 1.5 *La continuidad de la ciencia medieval y la del siglo XVII*

1.1. El método científico de los escolásticos tardíos

La actividad intelectual y práctica que se manifestó en los descubrimientos de hechos científicos y en el desarrollo de la tecnología, realizados en los siglos XIII y XIV se manifiesta también en la crítica puramente teórica de la concepción de la ciencia y de los principios fundamentales elaborados por Aristóteles que tuvo lugar en esa misma época. Estas críticas iban a producir el derrocamiento de todo el sistema de la física de Aristóteles. Gran parte de ellas se desarrollaron dentro del mismo pensamiento científico aristotélico. De hecho se puede considerar a Aristóteles como una especie de héroe trágico atravesando a zancadas el mundo de la ciencia medieval. Desde Grossetesta a Galileo, él ocupó el centro de la escena, seduciendo las mentes de los hombres con la promesa mágica de sus conceptos, excitando sus pasiones y dividiendo sus lealtades. En último término, les obligó a volverse

contra él como una consecuencia efectiva de la clarificación progresiva de su empresa; e incluso les proporcionó, desde las profundidades de su propio sistema, muchas de las armas con que fue atacado.

Las más importantes de estas armas nacieron de las nuevas ideas sobre el método científico, especialmente de las nuevas ideas sobre la inducción y el experimento, y sobre el papel de las matemáticas en la explicación de los fenómenos físicos. Estas ideas condujeron gradualmente a un concepto completamente diferente del tipo de problemas que debían plantearse en las ciencias naturales, el tipo de problema al que, de hecho, los métodos experimentales y matemáticos podían dar una respuesta. El terreno en el que el nuevo tipo de problemas iba a producir sus mayores efectos desde mediados del siglo XVI fue la Dinámica, y fueron las ideas aristotélicas sobre el espacio y el movimiento a las que correspondió la crítica más radical durante la última parte de la Edad Media. El efecto de esta crítica escolástica fue el de minar las bases de todo el sistema de la Física (excepto la Biología) y desbrozar el camino para el nuevo sistema edificado con los métodos experimental y matemático. A finales del período medieval se dio un nuevo impulso a las matemáticas y a la física matemática gracias a la traducción al latín y a la impresión de algunos textos griegos desconocidos o poco conocidos hasta entonces.

Cuando se leen obras científicas medievales, se debe recordar siempre que fueron escritas, de la misma forma que se escribe una obra científica actual, en el contexto de un tipo de exposición

aceptado y de una determinada conexión de problemas. El contexto académico de la exposición de la lógica y del método, lo mismo que de las matemáticas y de la ciencia de la naturaleza, era fundamentalmente el curso de artes, y aquellos que estudiaban Medicina veían ampliado su ámbito en algunas ramas de la Ciencia. La forma normal de exposición era la del comentario, que ya en el siglo XIV se había transformado en el método de proponer y tratar problemas específicos o *quaestiones* (*vide* vol. I, pp. 27, 137, 166, 204). Un lector actual puede verse confundido al leer un comentario o un tratado que aborda el tratamiento de un problema en su punto central y que supone no solamente un conocimiento del contexto y cuestiones previas, sino también de la manera y métodos apropiados de proponer una solución. En verdad, las obras científicas medievales no son siempre autoclarificadoras o fáciles de leer. Muchas de ellas casi parecen estar diseñadas especialmente para engañar al lector del siglo XX. Nos confundiremos si no nos damos cuenta de que el comentario no era simplemente una exposición del texto de Aristóteles o de alguna otra «autoridad», sino que aquél, y en un grado mayor las *quaestiones*, era un modo de presentar críticas y de proponer resultados y soluciones originales. E igualmente nos confundiríamos si traducimos las más aparentemente modernas de estas soluciones originales a expresiones del siglo XX, y olvidamos el contexto de hipótesis y concepciones en las que fueron propuestas y a los problemas de entonces a los que querían dar respuesta. El hecho de que tantos problemas en la ciencia medieval (y antigua) recubren problemas

similares en el contexto de la ciencia actual puede ser el mayor obstáculo para la comprensión histórica.

La gran idea recobrada durante el siglo XII, que hizo posible la expansión inmediata de la Ciencia a partir de ese momento, fue la idea de la explicación racional, como la demostración formal o geométrica; esto es, la idea de que un hecho concreto es explicado cuando podía ser deducido de un principio más general. Esto se produjo gracias a la recuperación gradual de la lógica de Aristóteles y de la matemática griega y árabe. La idea de la demostración matemática fue, en efecto, el gran descubrimiento de los griegos en la Historia de la Ciencia, y la base no sólo de sus importantes contribuciones a la misma matemática y a las ciencias físicas, como la Astronomía y la Óptica geométrica, sino también la base de gran parte de su Biología y Medicina. Su talante mental consistía en concebir, en lo posible, la Ciencia como una cuestión de deducciones a partir de principios primeros indemostrables.

En el siglo XII se desarrolló esta noción de la explicación racional en primer lugar entre los lógicos y filósofos que no se dedicaban primordialmente a la ciencia de la naturaleza, sino que se orientaban a captar y exponer los principios, primero, de la *lógica vetus* o «lógica antigua» basada en Boecio y, más avanzado el siglo, de los *Analíticos posteriores* de Aristóteles y de varias obras de Galeno. Lo que hicieron estos lógicos fue emplear la distinción, que proviene en último término de Aristóteles, entre el conocimiento experimental de un hecho y el conocimiento racional de la razón o causa del hecho; entendían por éste el conocimiento de algún

principio anterior o más general del cual se podía deducir el hecho. El desarrollo de esta forma de racionalismo fue, en efecto, parte de un movimiento intelectual general en el siglo XII; y no solamente los escritores científicos, como Adelardo de Bath y Hugo de San Víctor, sino también los teólogos, como San Anselmo, Ricardo de San Víctor y Abelardo, intentaron disponer sus temas de acuerdo con este método matemático-deductivo. La Matemática era para estos filósofos del siglo XII la ciencia racional modelo y, como buenos discípulos de Platón y San Agustín, sostuvieron que los sentidos eran engañosos y solamente la razón podía alcanzar la verdad.

Aunque la Matemática fue considerada en el siglo XII como la ciencia modelo, los matemáticos occidentales no se hicieron dignos de esta reputación hasta comienzos del siglo XIII. La matemática práctica conservada en los monasterios benedictinos durante la primera parte de la Edad Media, y enseñada en las escuelas catedralicias y monacales fundadas por Carlomagno al final del siglo VIII, era muy elemental y se limitaba a lo preciso para llevar las cuentas, calcular la fecha de la Pascua y medir la tierra para deslindar. Al final del siglo X, Gerberto inició una reavivación del interés por la Matemática, de la misma forma que hizo por la Lógica, recogiendo los tratados de Boecio sobre estos temas. Aunque el tratado de Boecio sobre la Matemática contenía una idea elemental del tratamiento de problemas teóricos basado en las propiedades de los números, la llamada *Geometría de Boecio* era, de hecho, una compilación tardía de la que había desaparecido la mayor parte de sus contribuciones. Contenía algunos de los axiomas, definiciones y

conclusiones de Euclides, pero consistía principalmente en una descripción del ábaco, el artificio usado generalmente para calcular, y de métodos prácticos de Agrimensura y temas parecidos. Las obras de Casiodoro y de Isidoro de Sevilla, las otras fuentes del saber matemático de la época, no contenían nada nuevo (vol. I, páginas 26-28).

El mismo Gerberto escribió un tratado sobre el ábaco e incluso mejoró el modelo corriente introduciendo ápices, y durante los siglos XI y XII se hicieron otras pocas añadiduras a la matemática práctica, pero hasta el final del siglo XII la matemática occidental continuó siendo casi enteramente una ciencia práctica. Los matemáticos de los siglos XI y XII pudieron utilizar las conclusiones de los geómetras griegos para fines prácticos, pero no fueron capaces de demostrar esas conclusiones, incluso aunque los teoremas del primer libro de los *Elementos*, de Euclides, fueron conocidos durante el siglo XI y la obra completa traducida por Adelardo de Bath a principios del siglo XII. Son ejemplos de la Geometría del siglo XI el intento de Francón de Lieja para conseguir la cuadratura del círculo cortando trozos de pergamino y la correspondencia entre Raimbaud de Colonia y Radolf de Lieja, en la que cada uno intentaba vanamente vencer al otro en un ensayo sin éxito de demostrar que la suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos rectos. Hasta finales del siglo XII apenas se encuentra alguna obra más valiosa.

En la Aritmética la situación era algo mejor debido a la conservación del tratado de Boecio sobre el tema. El mismo Francón, por ejemplo,

fue capaz de demostrar que era imposible expresar racionalmente la raíz cuadrada de un número que no era un cuadrado perfecto. Los progresos importantes que tuvieron lugar en la matemática occidental a principios del siglo XIII se realizaron primero en los campos de la Aritmética y el Algebra, y esto se debió en gran parte al desarrollo de esta tradición antigua por dos sabios con originalidad. El primero fue Leonardo Fibonacci de Pisa, que realizó la primera exposición latina completa del sistema arábigo, o hindú, de los números de su *Liber Abad* en 1202 (*vide* vol. I, p. 56). En obras posteriores hizo algunas aportaciones muy originales al Algebra teórica y a la Geometría; su saber básico se derivaba primordialmente de fuentes árabes, pero también de Euclides, Arquímedes, Herón de Alejandría y de Diofanto, del siglo III a. de C., el mayor de los tratadistas griegos de Algebra. Fibonacci sustituyó en algunas ocasiones los números por letras con el fin de generalizar sus demostraciones. Desarrolló el análisis indeterminado y la secuencia de números en la que cada uno es igual a la suma de los dos precedentes (llamada ahora «serie de Fibonacci»), interpretó el resultado negativo como deuda, utilizó el Algebra para resolver problemas geométricos (una innovación notable) y solucionó varios problemas que implicaban ecuaciones de cuarto grado.

El segundo matemático con originalidad en el siglo XIII fue Jordano Nemorarius, que no manifiesta huellas de influjo árabe, sino que desarrolló la tradición grecorromana aritmética de Nicómaco y Boecio, en especial la teoría de los números. Jordano hizo

habitualmente uso de letras en los problemas aritméticos con vistas a la generalización, y desarrolló ciertos problemas algebraicos que conducían a ecuaciones lineales y de cuarto grado. Fue también un geómetra original. Sus tratados contienen discusiones de antiguos problemas, como el de la determinación del centro de gravedad de un triángulo, y también la primera demostración general de la propiedad fundamental de la proyección estereográfica, que los círculos se proyectan como círculos (cf. vol. I, pp. 109-112).

Después de Jordano hubo un progreso gradual tanto en la geometría occidental como en otras partes de la Matemática. Apareció un gran número de ideas originales importantes. En una edición de los *Elementos* de Euclides, compuesta por Campanus de Novara alrededor de 1252, y que siguió siendo un manual clásico hasta el siglo XVI, éste incluía un estudio de las «cantidades continuas», a las que había llegado al considerar que el ángulo de contingencia entre una curva y su tangente es menor que cualquier ángulo entre dos líneas rectas. Haciendo uso de una inducción matemática que finalizaba en una *reductio ad absurdum*, demostró también la irracionalidad de la «sección áurea» o «número áureo», es decir, la división de una línea recta de forma que la razón de la sección menor a la mayor es igual a la de la mayor al todo. Calculó también la suma de los ángulos de un pentágono estrellado. En el siglo XIV, la comprensión del principio de la demostración geométrica hizo posible los perfeccionamientos introducidos en la Trigonometría por John Maudit, Ricardo de Wallingford y Levi ben Gerson (*vide* vol. I, página 94), y en la teoría de las proporciones por

Tomás Bradwardino y sus sucesores del Merton College, en Oxford, y por Alberto de Sajonia y otros en París y Viena. Esta obra sobre las proporciones, como la obra notable de Nicolás de Oresme sobre el empleo de las coordenadas y el empleo de gráficas para representar la forma de una función, se desarrolló principalmente en conexión con ciertos problemas de Física; será estudiada más adelante. También fueron de gran importancia las mejoras introducidas en los métodos de cálculo en el sistema de numerales hindú durante los siglos XIII y XIV. Los métodos de multiplicación y división empleados por los hindúes y musulmanes habían sido muy imprecisos. El método moderno de multiplicación fue introducido desde Florencia, y la técnica moderna de división también fue inventada a finales de la Edad Media. Esto hizo de la división un asunto corriente para la contabilidad casera, mientras que antes había sido una operación tremendamente difícil incluso para los matemáticos avezados. Los italianos inventaron también el libro de cuentas con el sistema de doble entrada, y se manifiesta el carácter comercial de sus preocupaciones en sus libros de Aritmética, en los que los problemas trataban de cuestiones prácticas, como la asociación, el cambio, el interés simple y el compuesto y el descuento.

La recuperación de la idea de ciencia demostrativa, en la que un hecho es explicado cuando puede ser deducido de un principio primero y más general, y los grandes avances en la técnica matemática que ocurrieron en la Cristiandad occidental durante el siglo XIII, fueron las principales conquistas intelectuales que

hicieron posible la ciencia del siglo XIII. Pero los filósofos de la naturaleza medievales no se detuvieron en esto en sus reflexiones sobre el método científico. En efecto, el nuevo saber suscitó problemas metodológicos importantes, de la misma forma que problemas generales de teoría científica. Fueron particularmente importantes los problemas, en la ciencia de la naturaleza, de cómo llegar a los primeros principios o a la teoría general de la que ha de provenir la demostración o explicación de los hechos concretos, y cómo distinguir, de entre varias teorías posibles, la errónea y la verdadera, la defectuosa y la completa, la inaceptable y la aceptable. Los filósofos medievales, al estudiar estos problemas, investigaron la relación lógica entre los hechos y las teorías, o entre los datos y las explicaciones, los procesos de adquisición del conocimiento científico, el empleo del análisis inductivo y experimental para parcelar un fenómeno complejo en sus componentes elementales, el carácter de la verificación y de la invalidación de las hipótesis y la naturaleza de la causalidad. Comenzaron a elaborar el concepto de la ciencia de la naturaleza como siendo en principio inductiva y experimental tanto como matemática, y comenzaron a desarrollar los procedimientos lógicos de la investigación experimental que caracteriza fundamentalmente la diferencia entre la ciencia moderna y la antigua.

En la Antigüedad clásica aparecieron varias concepciones totalmente diferentes del método científico dentro del esquema general de la ciencia demostrativa. El método de postulados patrocinado por Euclides se convirtió en el más eficaz en la

aplicación a los temas muy abstractos de la matemática pura y de la astronomía matemática, de la Estática y de la Óptica. En su carácter más puro no era experimental: se derivaban largas cadenas de deducciones a partir de premisas que eran aceptadas como autoevidentes. Por ejemplo, la mayor parte de los problemas investigados por Arquímedes, el mayor representante griego de este método, no exigía, incluso en la física matemática, ningún experimento: al formular la ley de la balanza y de la palanca, Arquímedes apelaba no al experimento, sino a la simetría. Pero en asuntos más complejos, en particular en la Astronomía, las hipótesis postuladas debían probarse mediante la comparación de las conclusiones cuantitativas, deducidas de ellas, con la observación.

El método dialéctico de Platón estaba próximo a este modo de argumentación; en él la argumentación era guiada por la aceptación provisional de una proposición y procedía luego a demostrar que o ella conducía a una autocontradicción o a una contradicción con algo aceptado como verdadero, o que no llevaba a contradicción. Esto daba base para aceptarla o rechazarla. El equivalente matemático de esta forma de argumentación es la *reductio ad absurdum* empleada ampliamente por los matemáticos griegos.

Muchos físicos griegos, al intentar estudiar no meramente temas matemáticos abstractos, sino problemas más difíciles de la materia (viva o inerte), adoptaron nuevamente una forma del método de postulados, proponiendo partículas teóricas, inobservables, con las que se construía un mundo teórico que debía adecuarse al

mundo observado. De esto es un ejemplo sobresaliente la teoría de Demócrito de los átomos y del vacío; otro es la física del *Timeo* de Platón (*vide* vol. I, pp. 41-43, e *infra*, pp. 41-42).

El método vigorosamente empírico de Aristóteles contrasta con esta aproximación abstractamente teórica. En lugar de postular explícitamente entidades inobservables para explicar el mundo observado, su procedimiento básico consistía en analizar las realidades observables directamente en sus partes y principios y reconstruir luego el mundo racionalmente a partir de los constituyentes descubiertos (*vide* vol. I, pp. 70-71). Este método no implicaba largas cadenas de deducciones, como se encuentran en Euclides, sino que mantenía sus conclusiones lo más próximas posibles a las cosas tal como eran observadas.

La historia del pensamiento griego sobre el método científico podemos representarla como un intento por parte de los matemáticos para imponer un esquema claramente postulador, que provocó la resistencia de quienes poseían, especialmente en la Medicina, una mayor experiencia de los enigmas de la materia. El drama puede ser seguido dentro de las mismas obras médicas de Hipócrates y continuado entre los físicos y fisiólogos de Alejandría. Este drama suscitó en un extremo un dogmatismo excesivo sobre la posibilidad de descubrir las causas, y en el otro las ideas escépticas de los sofistas y de la escuela empírica de Medicina. Continuó en la Edad Media, con la complicación adicional de que las traducciones disponibles no siempre permitían que las verdaderas ideas de los autores clásicos fueran claramente apreciadas o respetadas.

Grosetesta interpretó claramente a Aristóteles en un sentido platónico e introdujo en su lógica ejemplos de postulados tomados de Euclides.

Entre los autores griegos antiguos conocidos en los comienzos del siglo XIII, solamente Aristóteles y algunos autores médicos, en especial Galeno, habían estudiado seriamente el aspecto inductivo y experimental de la Ciencia; el mismo Aristóteles era, por supuesto, un médico. Algunos de los seguidores de Aristóteles en el Liceo y en Alejandría, en particular Teofrasto y Estratón, tuvieron una comprensión muy clara de algunos de los principios generales del método experimental, y parece que se realizaban experimentos habitualmente por los miembros de la escuela de Medicina de Alejandría. Pero las obras de estos autores eran casi desconocidas en la Edad Media. Incluso en su propia época, sus métodos no tuvieron el efecto transformador sobre la ciencia griega que iban a tener los métodos iniciados en la Edad Media sobre el mundo moderno.

Entre los árabes, algunos científicos realizaron experimentos: por ejemplo, Alkindi y Alhazen, al-Shirazi y al-Farisi, en Óptica, y Rhazes, Avicena y otros en Química, y algunos médicos árabes, especialmente Ali ibn Ridwan y Avicena, hicieron aportaciones a la teoría de la inducción. Pero por una razón u otra, la ciencia árabe no llegó a hacerse completamente experimental en su concepción, aunque fue, sin duda, el ejemplo de la obra árabe lo que estimuló algunos de los experimentos realizados por los autores cristianos, por ejemplo, Roger Bacon y Teodorico de Freiberg y posiblemente

Petrus Peregrinus, tratados en las páginas anteriores.

Antes de que la concepción griega de la Ciencia fuera enteramente recuperada, algunos estudiosos occidentales del siglo XII demostraron tanto que eran conscientes de la necesidad de pruebas en la Matemática, incluso aunque no pudieran darlas, como de que defendían, al menos en principio, que la naturaleza debe ser investigada por medio de la observación. El dicho *nihil est in intellectu quod non prius fuerit in sensu* se convirtió en lugar común, y un filósofo de la naturaleza como Adelardo de Bath describió experimentos sencillos y posiblemente realizó algunos de ellos. Al mismo tiempo, los estudiosos dieron un valor creciente a las aplicaciones prácticas de la Ciencia y a la exactitud y a la destreza manual desarrollada en las artes prácticas (*vide* vol. I, pp. 161 y ss.). En el siglo XIII, el conocimiento del concepto griego de la explicación teórica y de demostración matemática, conseguido gracias a las traducciones de obras clásicas y árabes, puso a los filósofos en una posición propicia para convertir el empirismo teórico ingenuo de sus predecesores en un concepto de la Ciencia que fuera a la vez experimental y demostrativa. De forma característica hicieron un intento, al recibir la ciencia antigua y árabe en el mundo occidental, no solamente para dominar su contenido técnico, sino también para comprender y prescribir sus métodos, y de ese modo se encontraron embarcados en una nueva empresa científica que les pertenecía por entero.

No se ha de suponer que este concepto filosófico de la ciencia experimental, desarrollado ampliamente en comentarios a los

Analíticos posteriores de Aristóteles y en los problemas contenidos en ellos, iba acompañado por una confianza ingenua en el método experimental tal como se la encuentra en el siglo XVII. La ciencia medieval se mantuvo en general dentro de la estructura de la teoría aristotélica de la naturaleza, y no siempre las deducciones de esta teoría eran rechazadas por completo, aun cuando se contradecían con los resultados de los nuevos procedimientos matemáticos, lógicos y experimentales. Incluso en medio de obras excelentes por otros conceptos, los científicos medievales mostraron una extraña indiferencia por las medidas exactas, y se les podría acusar de falsear datos, basados frecuentemente en experimentos imaginarios copiados de autores antiguos, que la simple observación podía haber corregido. No hay que suponer que cuando se aplicaron los nuevos métodos experimentales y matemáticos a los problemas científicos, esto se debió siempre al *resultado* de discusiones teóricas del método. De hecho, los ejemplos de investigaciones científicas emprendidas en aplicación de una concepción consciente del método tuvieron frecuentemente poco interés científico; mientras que algunos de los tratados científicos más interesantes, en especial los escritos durante el siglo XIII —por ejemplo, el de Jordano sobre Estática, el de Gerardo de Bruselas sobre Cinemática, el de Pedro Peregrinus sobre Magnetismo—, contienen muy poca o ninguna consideración de los problemas del método. Esto no significa que sus autores no estuvieran influenciados por las discusiones metodológicas; la obra de Gerardo de Bruselas ilustra ciertamente el influjo, no de las ideas de los filósofos, sino del modelo de

Arquímedes, el mayor de los físicos matemáticos griegos, cuyas obras tuvieron un papel en el desarrollo del pensamiento científico en la Edad Media que es objeto todavía de investigación histórica¹. En el siglo XIV, la influencia de las discusiones filosóficas sobre el método de la investigación de los problemas es tan evidente como importante. Pero los ejemplos mencionados demuestran que en la Edad Media, como en otras épocas, las discusiones metodológicas e investigaciones científicas pertenecían a dos corrientes distintas, incluso aunque sus aguas estuvieran a menudo tan profundamente mezcladas como lo estuvieron ciertamente en todo el período que estudiamos a continuación.

Entre los primeros en entender y utilizar la nueva teoría de la ciencia experimental se encuentra Roberto Grossetesta, que fue el auténtico fundador de la tradición del pensamiento científico en el Oxford medieval y, en cierta medida, de la tradición intelectual inglesa moderna. Grossetesta unió en sus propias obras las tradiciones experimental y racional del siglo XII y puso en marcha una teoría sistemática de la ciencia experimental. Parece que estudió Medicina, Matemáticas y Filosofía, de modo que estaba bien equipado. Basó su teoría de la Ciencia en primer lugar sobre la distinción de Aristóteles entre el conocimiento de un hecho (*demonstrado quia*) y el conocimiento de la razón de ese hecho (*demonstrado propter quid*). Su teoría poseía tres aspectos esencialmente distintos que, de hecho, caracterizan todas las discusiones de Metodología hasta el siglo XVII y, ciertamente, hasta nuestros días: el inductivo, el experimental y el matemático.

Grosetesta sostuvo que el problema de la inducción consistía en descubrir la causa a partir del conocimiento del efecto. Siguiendo a Aristóteles, afirmó que el conocimiento de hechos físicos concretos se obtenía a través de los sentidos, y que lo que los sentidos percibían eran objetos compuestos. La inducción implicaba el desmenuzamiento de estos objetos en los principios o elementos que los producían o que causaban su comportamiento; y concibió la inducción como un proceso creciente de abstracción que iba de lo que Aristóteles había dicho era «más cognoscible para nosotros», esto es, el objeto compuesto percibido por los sentidos, a los principios abstractos primeros en el orden de la naturaleza, pero menos cognoscibles de primer intento por nosotros. Debemos proceder inductivamente de los efectos a las causas antes de que podamos proceder deductivamente de la causa al efecto. Lo que debía hacerse al intentar explicar un conjunto concreto de hechos observados era, por tanto, llegar a establecer o definir el principio o «forma sustancial» que los causaba. Como escribía Grosetesta en su comentario a la *Física* de Aristóteles:

Puesto que buscamos el conocimiento y la comprensión por medio de principios, para que podamos conocer y comprender las cosas naturales, debemos en primer lugar determinar los principios que pertenecen a todas las cosas. El camino natural para que podamos alcanzar el conocimiento de los principios es partir de aplicaciones universales e ir a estos principios, partir de conjuntos que correspondan a estos precisos principios... Luego como, hablando en general, el procedimiento para

adquirir conocimiento es ir de los conjuntos compuestos universales a las especies más concretas, de la misma forma, partiendo de conjuntos completos que conocemos confusamente... podemos volver a esas partes precisas por medio de las cuales es posible definir el conjunto y, a partir de esta definición, alcanzar un conocimiento determinado del conjunto... Todo agente tiene lo que ha de ser producido, en alguna forma ya descrito y formado dentro de él; y de ese modo, la «naturaleza» como agente tiene las cosas naturales que han de ser producidas de algún modo descritas y formadas dentro de ella misma. Esta descripción y forma (dercriptio et formalio), que existe en la naturaleza misma de las cosas que han de ser producidas, antes de que sean producidas, es llamada, por tanto, conocimiento de su naturaleza².

Todas las discusiones del método científico deben presuponer una filosofía de la naturaleza, una concepción del tipo de causas y de principios que el método puede descubrir. A pesar de la influencia platónica manifestada en la significación fundamental que dio a la Matemática en el estudio de la Física, la estructura de la filosofía de Grossetesta era esencialmente aristotélica. Consideraba la definición de los principios que explican un fenómeno, de hecho, una definición de las condiciones necesarias y suficientes para producirlo, enteramente dentro de las categorías de las cuatro causas aristotélicas. Como escribía en el *De Natura Causarum* (publicado por L. Baur en su edición de las obras filosóficas de

Grosetesta en *Beiträge zur Geschichte der Philosophie des Mittelalter*, Münster, 1912, vol. IX, p. 121);

Así tenemos cuatro géneros de causas, y por éstas, cuando existen, debe ser una cosa causada en su realidad completa. Porque una cosa causada no puede seguirse de la existencia de cualquier otra causa, excepto estas cuatro, y ésa solamente es una causa de cuya existencia se sigue algo. Por tanto, no hay más causas que éstas, y de este modo hay en estos géneros un número de causas que es suficiente.

Para llegar a esta definición, Grosetesta describió primero un proceso doble que él llamó «resolución y composición». Estos términos provenían de los geómetras griegos y de Galeno y otros autores clásicos posteriores, y eran naturalmente la mera traducción latina de las palabras griegas que significan «análisis y síntesis»³. Grosetesta derivó el principio fundamental de su método de Aristóteles, pero lo desarrolló de una forma más completa de lo que había hecho Aristóteles. El método seguía un orden definido. Por medio del primer procedimiento, resolución, mostraba cómo ordenar y clasificar, según semejanzas y diferencias, los principios componentes o elementos que constituían un fenómeno. Esto le proporcionaba lo que él llamaba la definición nominal. Comenzó coleccionando casos del fenómeno que estaba examinando y anotando los atributos que todos ellos tenían en común, hasta que llegó a la «fórmula común» que establecía la conexión empírica observada; se sospechaba que existía una conexión causal cuando

se hallaba que los atributos estaban frecuentemente asociados juntos. Luego, por medio del proceso contrario de la composición, reordenando las proposiciones de forma que las más particulares parecieran derivarse deductivamente de las más generales, demostraba que la relación de lo general a lo particular era una relación de causa a efecto, es decir, disponía las proposiciones en un orden causal. Ilustró su método mostrando cómo llegar al principio común que hacía que los animales tuvieran cuernos, lo cual, como decía en su comentario a los *Analíticos posteriores*, libro 3, capítulo 4, «se debe a la falta de dientes en la mandíbula superior de estos animales a los que la naturaleza no da otros medios de defensa que sus cuernos», como hace con el ciervo con su rápida carrera y con el camello con su gran cuerpo. En los animales cornudos, la materia terrestre que debería haber ido a formar los dientes superiores iba, en vez de eso, a formar los cuernos. Añadía: «No tener dientes en ambas mandíbulas es también causa de tener varios estómagos», correlación que él atribuía a la masticación deficiente de los alimentos por los animales con una hilera de dientes.

Grosetesta, además de este proceso ordenado por el que se llegaba al principio causal por resolución y composición, consideró también, como había hecho Aristóteles, la posibilidad de una teoría o principio que explicara los hechos observados repetidamente y que fuera conseguida por un salto repentino o por intuición o imaginación científica. En todo caso, se presentaba luego un problema final, a saber, el de cómo distinguir entre las teorías falsas

y las verdaderas. Esto obligaba a introducir el uso de experimentos pensados especialmente o, donde no era posible interferir con las condiciones naturales, por ejemplo, en el estudio de los cometas o de los cuerpos celestes, el hacer observaciones que pudieran dar la respuesta a las preguntas específicas.

Grosetesta sostuvo que no siempre era posible en la ciencia de la naturaleza el llegar a una definición completa o a un conocimiento absolutamente cierto de la causa o forma de la que provenía el efecto, al contrario de lo que ocurría, por ejemplo, con los temas abstractos de la Geometría, como los triángulos. Se podía definir perfectamente un triángulo por algunos de sus atributos, por ejemplo, definiéndolo como una figura limitada por tres líneas rectas; a partir de esta definición se podía deducir analíticamente todas sus otras propiedades, de manera que causa y efecto eran recíprocos. Esto no era posible con las realidades materiales porque el mismo efecto podía provenir de más de una causa, y no era siempre posible conocer todas las eventualidades. «¿Puede conocerse la causa a partir del conocimiento del efecto de la misma forma que se puede demostrar que el efecto se deriva de la causa? -- escribía en el libro 2, capítulo 5, de su comentario a los *Analíticos posteriores*—. ¿Puede un efecto tener muchas causas? Porque si una causa determinada no puede ser conocida a partir del efecto, ya que no hay ningún efecto que no tenga alguna causa, se sigue que un efecto, precisamente como tiene una causa, puede tener también otra, y así puede haber varias causas de él.»

El punto de vista de Grosetesta parece ser el de que puede haber

una pluralidad aparente de causas, que los métodos de los que disponemos, así como el conocimiento que tenemos, no nos permiten reducirlas a una causa efectiva en la que está prefigurado unívocamente el efecto. En la ciencia de la naturaleza, como decía en el libro I, capítulo 11, existe, por tanto, una *minor certitudo*, debido a la lejanía de las causas de la observación inmediata y a la mutabilidad de las cosas naturales. La ciencia de la naturaleza ofrecía sus explicaciones «de forma probable más que científica... Solamente en las Matemáticas existe ciencia y demostración en sentido estricto». Era precisamente porque estaba en la naturaleza de las cosas el esconderse a nuestra inspección directa el que fuera necesario un método científico para sacar lo más certeramente posible a la luz esas causas «más cognoscibles por su naturaleza, pero no para nosotros». Grosetesta defendía que, haciendo deducciones de las distintas teorías propuestas y eliminando las teorías cuyas consecuencias eran contradichas por la experiencia, era posible acercarse estrechamente a un conocimiento auténtico de los principios causales o formas realmente responsables de los fenómenos del mundo de nuestra experiencia.

Como decía en su comentario a los *Analíticos posteriores*, libro I, capítulo 14:

Este es, por tanto, el camino por el que se alcanza el universal abstracto a partir de los singulares, gracias a la ayuda de los sentidos... Porque cuando los sentidos observan varias veces dos acontecimientos singulares de los cuales uno es la causa del otro, o está relacionado con él de alguna otra manera, y no ven la

conexión entre ellos, como, por ejemplo, cuando alguien observa frecuentemente que comer escamonea va acompañado por la segregación de bilis roja; entonces, de la observación constante de estas dos cosas observables comienza a formar una tercera cosa inobservable, a saber, el que la escamonea es la causa que saca la bilis roja. Y de esta percepción repetida una y otra vez, y conservada en la memoria, y del conocimiento sensible del que está hecha la percepción, comienza el funcionamiento del razonar. La razón en marcha comienza, por tanto, a admirarse y a considerar si las cosas son realmente como indica la memoria sensible, y estas dos cosas llevan a la razón a experimentar, a saber, que debe administrar escamonea después de que se han aislado y excluido todas las otras causas que purgan la bilis roja. Cuando ha administrado muchas veces escamonea con la exclusión cierta de todas las otras cosas que sacan la bilis roja, entonces se forma en la razón este universal, a saber, que toda escamonea saca por su naturaleza la bilis roja, y éste es el modo como se llega de la sensación a un principio experimentador universal.

Grosetesta basó su método de eliminación o refutación sobre dos hipótesis acerca de la naturaleza de la realidad. La primera era el principio de uniformidad de la naturaleza, que dice que las formas son siempre uniformes en el efecto que producen. «Las cosas de la misma naturaleza producen las mismas operaciones según su naturaleza»; decía, en su opúsculo *De Generatione Stellarum* (publicado por Baur en su edición de las obras filosóficas de

Grosetesta), que Aristóteles había defendido el mismo principio. La segunda hipótesis de Grosetesta era el principio de economía, que él generalizó a partir de varias afirmaciones de Aristóteles. Grosetesta utilizó este principio tanto para describir una característica objetiva de la naturaleza como un principio pragmático. «La naturaleza actúa según el camino más corto posible», decía en su *De Lineis, Angulis et Figuris*, y lo usó como un argumento para apoyar la ley de la reflexión de la luz y su propia «ley» de la refracción. También decía en su comentario sobre los *Analíticos posteriores*, libro I, capítulo 17:

La mejor demostración, siendo iguales las otras circunstancias, es la que necesita respuesta a un número más pequeño de cuestiones para ser una demostración perfecta, o requiere un número más pequeño de hipótesis y premisas de las que se sigue la demostración... porque nos da la Ciencia más rápidamente.

Grosetesta habla explícitamente en el mismo capítulo y en otros lugares de aplicar el método de la *reductio ad absurdum* a la investigación de los problemas de la naturaleza. Su método de invalidación es una aplicación de este método en una situación empírica. Lo usó explícitamente en varios de sus opúsculos científicos donde era adecuado, por ejemplo, en sus estudios sobre la naturaleza de las estrellas, sobre los cometas, la esfera, el calor y el arco iris. En el opúsculo *De Cometis* hay un buen ejemplo; en él considera sucesivamente cuatro teorías distintas propuestas por autores antiguos para explicar la aparición de los cometas. La primera era la propuesta por observadores que creían que los

cometas estaban provocados por la reflexión de los rayos del Sol al caer sobre un cuerpo celeste. La hipótesis, decía, era invalidada por dos consideraciones: primera, en términos de otra teoría física, porque los rayos reflejados no serían visibles, a menos que estuvieran asociados a un medio transparente de naturaleza terrestre y no celeste; y segunda, porque se observaba que la cola del cometa no siempre está extendida en la dirección opuesta al Sol, mientras que todos los rayos reflejados irían en la dirección opuesta a los rayos incidentes en ángulos iguales⁴,

Consideró las otras hipótesis en la misma forma en términos de «razón y experiencia», rechazando las que eran contrarias a lo que él creía una teoría establecida confirmada por la experiencia, o las contrarias a los datos de la experiencia (decía: *isla opimo falsificatur*); hasta que llegó a su definición final, que afirmaba había resistido a esas pruebas, de que «un cometa es fuego sublimado asimilado a la naturaleza de uno de los siete planetas». Luego utilizó esta teoría para explicar otros fenómenos ulteriores, incluyendo la influencia astrológica de los cometas.

Tiene todavía un mayor interés el método utilizado por Grosetesta en su intento de explicar la forma del arco iris (*vide* vol. I, páginas 98-99), cuando se atuvo a fenómenos más sencillos que podían estudiarse experimentalmente, la reflexión y la refracción de la luz, e intentó deducir la apariencia del arco iris a partir de los resultados del estudio de aquéllos. La misma obra de Grosetesta sobre el arco iris es algo elemental; pero la investigación experimental del problema que emprendió Teodorico de Freiberg es verdaderamente

notable, tanto por su precisión como por la comprensión consciente que muestra de las posibilidades del método experimental (*vide* vol. I, páginas 105 y ss.). Las mismas características se encuentran en las obras de otros científicos experimentales que vinieron después de Grosetesta, por ejemplo, en la de Alberto Magno, Roger Bacon, Petrus Peregrinus, Witelo y Themon Judaei, aun cuando casi todos estos autores puedan ser culpables de errores elementales. El influjo de Grosetesta es perceptible, especialmente en los que estudiaron el arco iris. Por ejemplo, las investigaciones iniciales de Roger Bacon y Witelo estaban encaminadas a descubrir las condiciones necesarias y suficientes para producir este fenómeno. La parte «resolutiva» de sus investigaciones les proporcionaron una respuesta parcial al definir la especie a la que pertenecía el arco iris y al distinguirlo de las especies a las que no pertenecía. Pertenecía a una especie de colores espectrales producidos por la refracción diferenciada del sol al pasar a través de las gotas de agua; como señalaba Bacon, ésta era diferente de las especies, por ejemplo, que incluían los colores vistos en las plumas iridiscentes. Además, un atributo suplementario del arco iris era el que estuviera producido por un gran número de gotas discontinuas. «Porque, como escribía Themon en sus *Quaestiones super Quatuor Libros Meteorum*, libro 3, cuestión 14, donde faltan esas gotas no aparece el arco iris ni ninguna de sus partes, aunque sean suficientes todas las otras condiciones exigidas.» Decía que esto podía ser comprobado por medio de experimentos con los arco iris de pulverizaciones artificiales. Roger Bacon hizo esos experimentos. Suponiendo las

condiciones exigidas —el Sol en una posición determinada respecto de las gotas de lluvia y del espectador—, resultaría un arco iris.

Una vez definidas estas condiciones, el propósito de la etapa siguiente de la investigación era descubrir cómo podían producir efectivamente un arco iris; esto es, construir una teoría que las asumiera de tal manera que pudiera deducirse de ella una afirmación que describiera los fenómenos. Los dos problemas esenciales eran explicar, primero, cómo eran formados los colores por las gotas de lluvia, y segundo, cómo podían ser remitidos al observador en la forma y orden en que eran vistos. Rasgos especialmente significativos de toda la investigación eran el empleo de modelos de gotas de lluvia en forma de redomas esféricas de agua y los procedimientos de verificación y refutación a los que era sometida cada teoría, en particular por los autores de teorías rivales. Por ejemplo, el descubrimiento de la refracción diferencial de los colores había señalado el camino de la solución del primer problema; Witelo intentó entonces resolver el segundo suponiendo que la luz del Sol se refractaba en línea recta a través de una gota de agua y los colores resultantes se reflejaban entonces hacia el observador desde las superficies convexas exteriores de las otras gotas que estaban detrás. Teodorico de Freiberg demostró que esta teoría no conduciría a los efectos observados, sino que éstos se derivaban de la teoría que él basaba sobre su propio descubrimiento de la reflexión interna de la luz dentro de cada gota. Así, por medio de la teoría y del experimento resolvió el problema que él mismo había planteado. Porque, como decía en el prefacio al *De Iride*, «la

función de la óptica es la de determinar lo que es el arco iris, porque, al hacerlo, muestra su razón, en la medida en que se añade a la descripción del arco iris el modo en que este tipo de concentración puede ser producido en la luz que va de cualquier cuerpo celeste luminoso a un lugar determinado en una nube, y entonces por medio de refracciones y reflexiones determinadas de los rayos es dirigida de ese lugar concreto al ojo».

Completamente diferente era el empleo de las Matemáticas en la ciencia de la naturaleza, aunque en muchos casos (de hecho, el del propio Galileo) iba a separarse muy poco del método experimental y de la realización de observaciones particulares para verificar o refutar las teorías. El mismo Grosetesta, debido a su «cosmología de la luz» (*vide* vol. I, pp. 15 y ss.), decía en su obra *De Natura Locorum* que, a partir de las «reglas y principios y fundamentos... dados por el poder de la Geometría, el observador cuidadoso de las cosas naturales puede dar la causa de todos los efectos naturales».

Y decía, desarrollando esta idea en su *De Lineis*:

Es de la mayor utilidad el considerar las líneas, los ángulos y las figuras porque es imposible entender la filosofía de la naturaleza sin ellos... Porque todas las causas de efectos naturales han de ser expresadas por medio de líneas, ángulos y figuras, porque de otro modo sería imposible tener conocimiento de la razón de estos efectos.

Grosetesta consideró de hecho las ciencias físicas como estando subordinadas a las ciencias matemáticas, en el sentido de que las

Matemáticas podían dar la razón de los hechos físicos observados; aunque al mismo tiempo mantenía la distinción aristotélica entre las proposiciones matemáticas y físicas en una teoría dada y afirmaba la necesidad de ambas para una explicación completa. Esencialmente, la misma actitud fue adoptada por muchos científicos influyentes a lo largo de la Edad Media y, en verdad, en una forma diferente por la mayor parte de los autores del siglo XVII. Las Matemáticas podían describir lo que acontecía, podían relacionar las variaciones concomitantes en los fenómenos observados, pero no podían decir nada acerca de la causa eficiente y de las otras que producían el movimiento porque era explícitamente una abstracción de tales causas (*vide* vol. I, pp. 96-97). Esta fue una actitud observada tanto en la Óptica como en la Astronomía en el siglo XIII (*vide* vol. I, páginas 98-99 y ss.).

Con el paso del tiempo, la conservación de las explicaciones causales, «físicas», que habitualmente significaban explicaciones tomadas de la física cualitativa de Aristóteles, se hicieron cada vez más embarazosas. La gran ventaja de las teorías matemáticas consistía precisamente en que podían ser utilizadas para relacionar variaciones concomitantes en una serie de observaciones realizadas con instrumentos de medida de forma que la verdad o falsedad de estas teorías, y las circunstancias exactas en las que se mostraban falsas, podían determinarse con facilidad experimentalmente. Fue precisamente esta consideración la que produjo el triunfo de la astronomía ptolemaica sobre la aristotélica hacia finales del siglo XIII (*vide* vol. I, p. 87). Era difícil, en contraste con esta clara

comprensión del papel de las Matemáticas en la investigación científica, ver qué se debía hacer con una teoría de las causas «físicas», por muy necesarias que parecieran teóricamente para dar una explicación completa de los fenómenos observados. Además, muchos de los aspectos de la filosofía física de Aristóteles eran un obstáculo positivo para el empleo de las Matemáticas. Ya desde el principio del siglo XIV se hicieron intentos para soslayar estas dificultades diseñando nuevos sistemas en la Física, en parte debido a la influencia del neoplatonismo reavivado y en parte al influjo del «nominalismo» resucitado por Guillermo Ockham.

Varios autores posteriores a Grosetesta hicieron mejoras en la teoría de la inducción, y el enorme y continuado interés por estas cuestiones puramente teóricas y lógicas constituye un buen indicador del clima intelectual en el que se desarrollaba la Ciencia antes de mediados del siglo XVII. Quizá esto pueda contribuir a explicar el porqué los brillantes inicios de la ciencia experimental, constatados en el siglo XIII y principios del XIV, no dieron unos frutos que de hecho no aparecieron hasta el siglo XVII. Durante casi cuatro siglos, a partir del comienzo del siglo XIII, la cuestión que dirigía la investigación científica fue descubrir lo real, lo permanente, lo inteligible, tras el mundo cambiante de la experiencia sensible, bien fuera esta realidad algo cualitativo, según se ha concebido al comienzo de dicho período, o bien algo matemático, como Galileo y Kepler iban a concebirla al final. Algunos aspectos de esta realidad podían ser desvelados por la Física o la ciencia de la naturaleza, otros por la Matemática, otros

por la Metafísica; sin embargo, aunque estos distintos aspectos constituyesen facetas de una realidad única, no podían ser todos investigados de la misma forma o conocidos con la misma certeza. Por este motivo era esencial el ser explícitos sobre los métodos de investigación y explicación legítimas en cada caso y sobre lo que cada uno podía desvelar de la realidad subyacente. En la mayor parte de obras científicas hasta la época de Galileo se realiza una discusión de la Metodología *pari passu* con la exposición de una investigación concreta, y esto era una parte necesaria de la empresa de la que salió la ciencia moderna. Sin embargo, desde el comienzo del siglo XIV hasta principios del XVI hubo entre las mejores mentes una tendencia a interesarse cada vez más por problema» de lógica pura divorciados de la práctica experimental de la misma forma que en otros campos se interesaron más por hacer críticas puramente teóricas, aunque necesarias también, a la física de Aristóteles sin molestarse en hacer observaciones (*vidé* infra páginas 40 y ss.).

Quizá el primer autor después de Grossetesta que trata seriamente el problema de la inducción sea Alberto Magno. Este poseía una buena comprensión de los principios generales tal como se entendían entonces, pero tiene mayor interés la obra realizada por Roger Bacon. Este decía en el capítulo 2 de la parte VI de su *Opus Majas*, «Sobre la ciencia experimental»:

En ciencia experimental tiene tres grandes prerrogativas respecto a las otras ciencias. La primera es que investiga por medio del experimento las conclusiones nobles de todas las ciencias. Porque las otras ciencias saben cómo descubrir sus

principios por medio de experimentos, pero sus conclusiones son obtenidas por medio de argumentos basados en los principios descubiertos. Pero si ellas deben tener experiencia concreta y completa de sus conclusiones es necesario entonces que la tengan con la ayuda de esta noble ciencia. Es cierto en verdad, que la Matemática posee experiencia general respecto a sus conclusiones en el caso de figuras y números, que son aplicadas de la misma forma a todas las ciencias y a esta ciencia experimental, porque ninguna ciencia puede ser conocida sin las matemáticas. Pero si dirigimos nuestra atención a las experiencias que son concretas y completas y están enteramente comprobadas en su propia disciplina, es necesario atenerse al modelo de consideraciones de esta ciencia que se llama experimental.

La primera prerrogativa de la ciencia experimental de Roger Bacon era, pues, confirmar las conclusiones del razonamiento matemático; la segunda era añadir a la ciencia deductiva un saber que por sí misma no podía conseguir, como, por ejemplo, en la Alquimia; y la tercera era descubrir campos del saber todavía no alumbrados. El admitía que su ciencia experimental era tanto una ciencia aplicada independiente, en la que se ponía a prueba los resultados de las ciencias de la naturaleza y especulativas en orden a su utilidad práctica, como un método inductivo. Su intento de descubrir la causa del arco iris (*vide* vol. I, pp. 104-105), con el que ilustra la primera prerrogativa de la ciencia experimental, muestra que había

captado los principios esenciales de la inducción por medio de los cuales el investigador pasaba de los efectos observados al descubrimiento de la causa y aislaba la auténtica causa eliminando las teorías que eran contradichas por los hechos.

Con Roger Bacon se hace explícito el programa de la matematización de la Física y el cambio en el objeto de la investigación científica, desde la «naturaleza» o «forma» aristotélica a las leyes científicas, desde la «naturaleza» o de la naturaleza en un sentido evidentemente moderno (*vide infra* páginas 83 y ss.). Haciéndose eco de la obra de Grossetesta, escribía, por ejemplo, en su *Opus Majus*, parte 4, distinción 4, capítulo 8: «En las cosas de este mundo, por lo que respecta a sus causas eficientes y generativas, no puede conocerse nada sin el poder de la Geometría.» El lenguaje que usó al tratar la «multiplicación de las especies» parece asociar este programa general de forma inequívoca a la investigación de leyes predictivas. En *Un fragment inédit de l'Opus Tertium*, editado por Duhem (p. 90), escribió: «Que las leyes (*leges*) de la reflexión y de la refracción son comunes a todas las acciones naturales lo he mostrado en el tratado de la Geometría.» Pretendía haber demostrado la formación de la imagen en el ojo «por la ley de la refracción», señalando que la «especie del objeto visto» debe propagarse en el ojo de forma que «no viole las leyes que la naturaleza observa en los cuerpos de este mundo». Normalmente, las «especies» de la luz se propagaban en línea recta; pero en las sinuosidades de los nervios, «el poder del alma hace que la especie abandone las leyes comunes de la naturaleza (*leges communes*

naturae) y se comporte de una manera que se adecúa a sus operaciones» (*ibid.*, p. 78).

Durante unos trescientos años a partir de mediados del siglo XVIII se realizó la más interesante serie de discusiones sobre la inducción por parte de los miembros de varias escuelas médicas, y en éstos se observa una muy marcada tendencia hacia la lógica pura. El mismo Galeno había reconocido la necesidad de un método para descubrir las causas que explicaban los efectos observados, cuando establecía la distinción entre el «método de experiencia» y el «método racional». Consideraba a los efectos o síntomas como «signos», y decía que el «método de experiencia» consistía en proceder inductivamente de estos signos a las causas que los producían, y que este método precedía necesariamente al «método racional», que de las causas demostraba, mediante silogismos⁵, los efectos. Las ideas de Galeno habían sido desarrolladas por Avicena en su *Canon de Medicina*, que contenía una discusión interesante de las condiciones que debían ser observadas al inducir las propiedades de los medicamentos a partir de sus efectos. El tema fue estudiado en el siglo XIII por el médico portugués Pedro Hispano, que murió en 1277, siendo Papa con el nombre de Juan XXI, en sus *Comentarios a Isaac*, una obra sobre dietas y medicamentos. En primer lugar, decía, el medicamento administrado debe estar exento de sustancias extrañas. En segundo lugar, el enfermo que lo toma debe tener la enfermedad para la que está especialmente recomendado. Tercero, debe ser administrado solo, sin mezcla de otros medicamentos. Cuarto, debe ser de grado opuesto al de la

enfermedad⁶. Quinto, la prueba debe hacerse no una sola vez, sino muchas veces. Sexto, los experimentos se han de realizar con el cuerpo adecuado, el de un hombre, y no el de un asno. Juan de San Amando, contemporáneo de Pedro Hispano, repetía a propósito del quinto punto la advertencia de que un medicamento que había producido un efecto cálido sobre cinco personas no debía tener necesariamente siempre el mismo efecto, porque las personas en cuestión podían haber sido todas de una constitución fría y templada, mientras que una persona de naturaleza cálida no habría encontrado el medicamento cálido.

Desde el principio del siglo XIV, el tema de la inducción fue estudiado en la escuela de Medicina de Padua, donde el clima[^] era completamente aristotélico, debido al influjo de los averroístas, que habían llegado a dominar la Universidad. Estos lógicos médicos, desde la época de Pedro de Abano, en su famoso *Conciliator*, en 1310, hasta Zarabella, al comienzo del siglo XVI, desarrollaron los métodos de «resolución y composición» hasta convertirlos en una teoría de la ciencia experimental muy distinta del mero método de observar los casos ordinarios y cotidianos con los que Aristóteles y algunos escolásticos antiguos se habían contentado para verificar sus teorías científicas. Partiendo de observaciones, el hecho complejo era «resuelto» en sus partes componentes: la fiebre en sus causas, porque cualquier fiebre viene o del calentamiento humor, o de los espíritus, o de los miembros; y a su vez, el calentamiento del humor es o de la sangre, o de la flema, etc.; hasta que llegas a la causa específica y distinta y al conocimiento de esa fiebre, como

decía Jacopo da Forli (muerto en 1413) en su comentario al *Super Tegni Galeni*, comm. text. I. Se imaginaba entonces una hipótesis de la que pudieran ser deducidas las observaciones, y estas consecuencias deducidas sugerían un experimento por medio del cual se podía verificar la hipótesis. Este método era seguido por los médicos de la época en las autopsias realizadas para descubrir el origen de una enfermedad o las causas de la muerte, y en el estudio clínico de los casos médicos y quirúrgicos recogidos en los *consilia*. Se ha demostrado que el mismo Galileo obtuvo mucha de la estructura lógica de su ciencia a partir de sus predecesores de Padua, cuyos términos técnicos utilizó (*vide infra* pp. 126 y ss.), aunque no fue tan lejos como para aceptar la conclusión de un miembro tardío de esta escuela, Agostino Nifo (1506), que dijo que, puesto que las hipótesis de la ciencia de la naturaleza descansaban solamente sobre los hechos que permitían explicar, toda la ciencia de la naturaleza era, por tanto, meramente conjetural e hipotética. El doble procedimiento de la resolución y la composición recibió en Padua el nombre averroísta de *regressus*. Nifo, al estudiar esta «regresión», comenzando con la investigación de la causa de un efecto observado, escribió en su *Expositio super Ocio Aristotelis Libros de Physico Auditu*, publicado en Venecia en 1552, libro I, comentario 4:

Cuando considero más atentamente las palabras de Aristóteles, y los comentarios de Alejandro y Temisto, de Filopón y Simplicio, me parece que, en la regresión experimentada en las demostraciones de la ciencia de la naturaleza, el primer proceso, por el que el

descubrimiento de la causa se pone en forma silogística, es un mero silogismo hipotético (coniecturalis)... Pero el segundo proceso, por el que se pone en forma de silogismo la razón de por qué el efecto lo es a partir de la causa descubierta, es una demostración propter quid —no que nos haga conocer simpliciter, sino condicionalmente (ex conditione), supuesto que ésa es realmente la causa, o supuesto que las proposiciones que la representan como la causa son verdaderas, y que ninguna otra cosa puede ser la causa... Alejandro... afirma que el descubrimiento de los círculos de los epiciclos y excéntricos a partir de las apariencias que vemos es conjetural... Dice que el proceso opuesto es una demostración, no porque nos haga conocer simpliciter, sino condicionalmente, supuesto que ésas sean las causas realmente y que ninguna otra cosa pueda ser la causa: porque si ellas existen, así se comportan las apariencias, pero no conocemos simpliciter si alguna otra puede ser la causa... Pero puedes objetar, en este caso, que la ciencia de la naturaleza no es una ciencia simpliciter, como las matemáticas. Sin embargo, es una ciencia propter quid, porque la causa descubierta, alcanzada por medio de un silogismo conjetural, es la razón de que el efecto lo sea... Que algo es una causa no puede ser nunca tan cierto como el que un efecto existe (quia est), porque la existencia de un efecto la conocen los sentidos. El que exista la causa sigue siendo una conjetura...

Toda la tradición pregalileana del método científico en Padua fue resumida finalmente por Jacopo Zabarella (1533-1589) en una serie

de tratados sobre el tema. Participando de la concepción que se había desarrollado desde el siglo XIII de que las explicaciones científicas de la naturaleza eran hipotéticas, escribió en el capítulo 2 del *De regressu*: «Las demostraciones son hechas por nosotros y para nosotros, no para la naturaleza.» Y continuaba en el capítulo 5:

Hay, a mi juicio, dos cosas que nos ayudan a conocer distintamente la causa. Una es el conocimiento de que es, que nos prepara para descubrir lo que es. Porque cuando hacemos alguna hipótesis sobre la materia, somos capaces de buscar y de descubrir algo distinto en ella; cuando no hacemos ninguna hipótesis, nunca descubriremos nada... Por tanto, cuando encontramos una posible causa, estamos en situación de buscar y descubrir lo que es. La otra ayuda, sin la cual la primera no bastaría, es la comparación de la causa descubierta con el efecto a través del cual fue descubierta, no ciertamente con el conocimiento pleno de que ésta es la causa y éste el efecto, sino precisamente comparando esta cosa con aquélla. De este modo sucede que somos conducidos gradualmente al conocimiento de las condiciones de esa cosa; y cuando una de las condiciones ha sido descubierta, tenemos ayuda para descubrir otra, hasta que finalmente conocemos que ésta es la causa de ese efecto... La regresión implica, pues, necesariamente tres partes. La primera es la «demostración de que», por la cual somos llevados de un conocimiento confuso del efecto a un conocimiento confuso de la causa. La segunda es esta «consideración mental» por la que, de un conocimiento confuso de la causa, adquirimos un conocimiento

preciso de ella. La tercera es la demostración en sentido estricto, por la que finalmente varaos de la causa conocida distintamente al conocimiento preciso del efecto... De lo que hemos dicho puede quedar claro el que sea imposible conocer completamente que esto es la causa de este efecto, a menos que conozcamos la naturaleza y condiciones de esta causa por las que es capaz de producir tal efecto.

Tuvieron gran importancia para el conjunto de la ciencia de la naturaleza las discusiones sobre la inducción realizadas por dos frailes franciscanos de Oxford que vivieron al final del siglo XIII y comienzos del XIV. Con ellos, y especialmente con el segundo, comenzó el ataque más radical contra el sistema de Aristóteles desde un punto de vista teórico. Ambos se preocuparon por los fundamentos naturales de la certeza del conocimiento, y el primero, Juan Duns Scoto (hacia 1266-1308), puede ser considerado como la recapitulación de la tradición del pensamiento de Oxford acerca de la «teoría de la Ciencia», que comenzó con Grosetesta, antes de que esa tradición fuera proyectada violentamente hacia nuevas direcciones por su sucesor Guillermo Ockham (hacia 1284-1349). Cada uno de ellos expuso su punto de vista fundamental en una época temprana de su vida en una obra teológica, sus comentarios a las *Sentencias* de Pedro Lombardo.

La contribución principal realizada por Scoto al problema de la inducción fue la distinción muy clara que estableció entre las leyes causales y las generalizaciones empíricas. Scoto dijo que la certeza

de las leyes causales descubiertas en la investigación del mundo físico estaba garantizada por el principio de uniformidad de la naturaleza, que él consideraba como una hipótesis autoevidente de la ciencia inductiva. Aun cuando era posible tener experiencia de sólo una muestra de los fenómenos asociados que se investigaba, la certeza de la conexión causal subyacente a la asociación observada era conocida por el investigador, decía (en su *Comentario de Oxford*, libro 1, distinción 3, cuestión 4, artículo 2), «por la proposición siguiente que descansa en el alma: *Todo lo que ocurre en muchos casos por una causa que no es libre (i. e., no voluntaria) es el efecto natural de esa causa*». El conocimiento científico más satisfactorio era aquel en el que la causa era conocida, como, por ejemplo, en el caso de un eclipse de luna deducible de la proposición: «un objeto opaco interpuesto entre un objeto luminoso y un objeto iluminado impide la transmisión de la luz al objeto iluminado». Aun cuando la causa no fuera conocida y «uno debiera detenerse en una verdad que se mantiene en muchos casos, de la que los términos extremos [de la proposición] frecuentemente se observan unidos, como, por ejemplo, que una hierba de tal y tal especie es cálida» —incluso entonces, es decir, cuando fuere imposible ir más allá de una generalización empírica—, la certeza de que existía una conexión causal estaba garantizada por la uniformidad de la naturaleza.

Por su lado, Guillermo Ockham era escéptico respecto de la posibilidad de conocer alguna vez las conexiones causales particulares o de ser capaz de definir las sustancias particulares, aunque no negó la existencia de causa o de sustancias como

identidad que persistía a través del cambio. De hecho, creía que las conexiones establecidas empíricamente poseían una validez universal en razón de la uniformidad de la naturaleza, que, al igual que Scoto, consideraba como una hipótesis autoevidente de la ciencia inductiva. Su importancia para la historia de la Ciencia proviene, en parte, de ciertos perfeccionamientos que introdujo en la teoría de la inducción, pero mucho más del ataque que hizo contra la física y la metafísica de su tiempo como resultado de los principios metodológicos que él adoptó.

Ockham basó el tratamiento de la inducción sobre dos principios. Primero, defendió que el único conocimiento cierto sobre el mundo de la experiencia era el que llamaba «conocimiento intuitivo», adquirido por la percepción de cosas individuales a través de los sentidos. Así, como decía en la *Summa Totius Logicae*, parte 3, parte, 2, capítulo 10, «cuando una cosa sensible ha sido aprehendida por los sentidos... el intelecto también puede aprehenderla», y solamente eran incluidas en lo que él llamaba «ciencia real» proposiciones sobre cosas individuales. Todo el resto, todas las teorías construidas para explicar los hechos observados, comprendía la «ciencia racional», en la que los nombres representan meramente conceptos y no algo real.

El segundo principio de Ockham era el de economía, el llamado «navaja de Ockham». Había sido ya establecido por Grossetesta, y Duns Scoto y otros franciscanos de Oxford habían dicho que era «superfluo trabajar con más entidades cuando era posible trabajar con menos». Ockham expresó este principio de varias maneras a lo

largo de sus obras; una forma común era la que usaba en sus *Quodlibeta Septem*, quodlibeto, 5, cuestión 5. «No se debe afirmar una pluralidad sin necesidad.» La conocida frase *Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* no fue introducida hasta el siglo XVII por un cierto Juan Ponce de Cork, que era un seguidor de Duns Scoto.

Los perfeccionamientos que Ockham hizo en la lógica de la inducción se basaban principalmente en su reconocimiento del hecho de que «la misma especie de efecto puede existir por muchas cosas diferentes», como decía en el mismo capítulo de la *Summa Totius Logicae* citado antes. Estableció reglas para determinar las conexiones causales en casos concretos, como en el fragmento siguiente de su *Super Libros Quatuor Sententiarum*, libro 1, distinción 45, cuestión 1, D:

Aunque no pretendo decir universalmente lo que es una causa inmediata, digo, sin embargo, que esto es suficiente para que algo sea una causa inmediata, a saber, que cuando ella está presente, se siga el efecto, y cuando no está presente, siendo iguales todas las otras condiciones y disposiciones, el efecto no se siga. De ahí que todo lo que tiene esa relación a algo es una causa inmediata de ello, aunque quizá no viceversa. Que esto es suficiente para que algo sea una causa inmediata de algo es claro, porque no hay otro modo de conocer que algo es una causa inmediata de algo... Se sigue que si, al eliminar la causa universal o particular, el efecto no se produce, entonces ninguna de esas cosas de las que por ellas solas el efecto no puede ser

producido es la causa eficiente, y, por consiguiente, ninguna es la causa total. Se sigue también que toda causa propiamente dicha es una causa inmediata, porque una causa propiamente dicha que puede estar presente o ausente sin tener ninguna influencia sobre el efecto, y que cuando está presente en otras circunstancias no produce el efecto, no puede ser considerada como una causa, pero esto es como sucede con toda otra causa, excepto la causa inmediata, como es claro inductivamente.

Esto se parece hasta cierto punto al *Método de acuerdo y diferencia* de J. Stuart Mili. Ya que el mismo efecto podía tener diferentes causas, era preciso eliminar las hipótesis rivales. «Así —decía Ockham en la misma obra, prólogo, cuestión 2, G—,

supongamos esto como un principio primero: todas las hierbas de tal y tal especie curan a un enfermo de fiebre. Esto no puede demostrarse por silogismo a partir de una proposición mejor conocida, sino que es conocido por conocimiento intuitivo y quizá de muchos casos. Porque ya que él observó que después de comer tales hierbas el enfermo curó, y él eliminó todas las otras causas de su curación, sabía con certeza que esta hierba era la causa de la curación, y él tenía entonces un conocimiento experimental de una relación particular.»

Ockham negó el que se pudiera probar, fuera partiendo de principios primeros, fuera partiendo de la experiencia, el que un efecto determinado tuviera una causa final. «La característica

especial de una causa final —decía en sus *Quodlibeta Septem*, quodlibeto 4, cuestión 4— es que puede causar cuando no existe»; «de lo que sigue que este movimiento hacia un fin no es real, sino metafórico», concluía en su *Super Quatuor Libros Sententiarum*, libro 2, cuestión 3, G. Esta proposición era, de hecho, un lugar común y fue empleada, por ejemplo, por Alberto Magno y Roger Bacon. Para Ockham, solamente eran reales las causas inmediatas o próximas, y la «causa total» de un fenómeno era la suma de todos los antecedentes que bastaban para producir el fenómeno.

El efecto del ataque de Ockham a la física y a la metafísica de su tiempo fue destruir la creencia en la mayor parte de los principios sobre los que se basaba el sistema de la física del siglo XIII. En particular atacó las categorías aristotélicas de «relación» y de «sustancia» y el concepto de causalidad. Defendió que las relaciones, como la de estar una cosa sobre la otra en el espacio, no tenían realidad objetiva, aparte de las cosas individuales perceptibles entre las que se observaba la relación. Según él, las relaciones eran simplemente conceptos formados por la mente. Esta idea era incompatible con la idea aristotélica de que el cosmos tenía un principio objetivo de orden, según el cual sus sustancias componentes estaban ordenadas, y abrió el camino a la noción de que todo movimiento era relativo en un espacio geométrico indiferente sin diferencias cualitativas.

Ockham dijo, al tratar de la «sustancia», que sólo se poseía experiencia de los atributos y que no se podía demostrar el que unos determinados atributos observados fueran causados por una

«forma sustancial» determinada. Defendió que las secuencias regulares de fenómenos eran simplemente secuencias de hecho y que la función primaria de la Ciencia era establecer estas secuencias por la observación. Era imposible tener certeza de una conexión causal concreta, porque la experiencia proporcionaba conocimiento evidente sólo de los objetos o fenómenos individuales y nunca de la relación entre ellos como causa y efecto. Por ejemplo, la presencia del fuego y la sensación de quemazón eran observadas como produciéndose asociadas, pero no podía demostrarse que hubiera una conexión causal entre ellas. No podía demostrarse que un hombre concreto fuera un hombre y no un cadáver manipulado por un ángel. En el curso natural de las cosas, la sensación era producida por un objeto existente, pero Dios podía darnos sensación sin objeto. Este ataque contra la causalidad iba a conducir a Ockham a hacer afirmaciones revolucionarias en el tema del movimiento (*vide infra* pp. 63-69).

Un grado aún mayor de empirismo filosófico, y que no volvería a alcanzarse hasta la obra de David Hume, en el siglo XVIII, fue logrado por un francés contemporáneo de Ockham, Nicolás de Autrecourt (muerto después de 1350). Este dudó absolutamente de la posibilidad de conocer la existencia de sustancia o de relaciones causales. Al igual que Ockham, limitando la certeza evidente a lo que era conocido a través de «la experiencia intuitiva» y a través de las implicaciones lógicamente necesarias, llegó a la conclusión —en un pasaje publicado por J. Lappe en *Beiträge zur Geschichte der Philosophie des Mittelalters* (1908, vol. VI, parte 2, p. 9)—: «del hecho

de que se sepa que una cosa existe no se puede inferir evidentemente que otra cosa existe», o no existe; de lo cual él concluía que del conocimiento de los atributos no era posible inferir la existencia de las sustancias. Y decía en *Exigit Ordo Executionis*, editado por J. R. O'Donnell, en *Medieval Studies* (1939, vol. I, p. 237):

Respecto de las cosas sabidas por experiencia al modo como se dice que se sabe que el ruibarbo cura el cólera o que el imán atrae al hierro, sólo poseemos un hábito de hacer conjeturas (solum habitas conjecturativus), pero no certeza. Cuando se dice que tenemos certeza respecto de tales cosas en virtud de una proposición que reposa en el alma de que lo que ocurre en muchas ocasiones por un curso no libre es el efecto natural de ello, yo pregunto ¿qué es lo que llamas una causa natural, i. e., dices que lo que produjo en el pasado en muchas ocasiones y produce en el presente y producirá en el futuro si permanece y es aplicado? Entonces la menor [premisa] no es conocida, porque admitiendo que algo fue producido en muchas ocasiones, no es, sin embargo, conocido que deba ser producido de la misma manera en el futuro.

Y así, decía en un fragmento publicado por Hastings Rasdhall en *Proceedings of the Aristotelian Society*, N. S. vol. VII:

Cualquiera que sean las condiciones que suponemos puedan ser la causa de un efecto, no sabemos, evidentemente, que, cuando se pongan esas condiciones, se seguirán los efectos en cuestión.

El efecto de esta búsqueda de conocimiento evidente sobre la Filosofía en general fue desviar el interés, dentro de las discusiones de escuelas, de los problemas tradicionales de la Metafísica hacia el mundo de la experiencia. El nominalismo o, como podía ser llamado más propiamente, «terminismo» ockhamista continuó demostrando que en el mundo de la naturaleza todo era contingente y, por tanto, que las observaciones eran necesarias para descubrir algo sobre él. La relación entre la fe y la razón continuó siendo un problema central en la especulación medieval, y los agustinianos, tomistas, averroístas y ockhamistas adoptaron diferentes actitudes a su respecto. Como propuso R. McKeon en sus *Selections from Medieval Philosophers* (vol. II, pp. IX-X): «El espíritu y la empresa de la filosofía medieval más temprana es el de la fe comprometida a entenderse a sí misma.» Entre la filosofía de San Agustín y la del Aquinate se había pasado de la consideración de la verdad como un reflejo de Dios a la verdad en la relación de las cosas entre ellas y con el hombre, dejando la relación con Dios para la Teología. El mismo Ockham divorció vigorosamente la Filosofía de la Teología, aquella derivaba su saber de la revelación, y ésta, de la experiencia sensible, que era su único origen. Y mientras los averroístas se dirigían a mantener la posibilidad de la «doble verdad» (*vide* vol. I, p. 67), los ockhamistas, por ejemplo. Nicolás de Autrecourt, buscaron una solución al problema con su doctrina del «probabilismo». Entendían por esto que la filosofía natural podía ofrecer un sistema de explicaciones probables, pero no necesarias, ya que allí donde este sistema de proposiciones probables contradecía las

proposiciones necesarias de la revelación era erróneo. En su propio intento de alcanzar el sistema más probable de Física, Nicolás hizo un ataque completo al sistema aristotélico y llegó a la conclusión de que el sistema más probable era el basado en el atomismo. Después de esta época no se hicieron más intentos de construir sistemas que sintetizaran racionalmente a la vez los contenidos de la razón y de la fe. En vez de ello comenzó un período de confianza en el sentido literal de la Biblia en vez de la enseñanza de una Iglesia instituida divinamente, un período de misticismo especulativo observado en Eckhart (hacia 1260-1327) y Enrique Susón (hacia 1295-1365), y de empirismo y escepticismo observado en Nicolás de Cusa (1401-1464) y Montaigne (1533-1592). Nicolás de Cusa, por ejemplo, sostuvo que, aunque era posible aproximarse cada vez más a la verdad, no era posible aprehenderla definitivamente, de la misma manera que era posible dibujar figuras que se aproximaban cada vez más a un círculo perfecto, pero ninguna figura que dibujáramos sería tan perfecta que no pudiera dibujarse un círculo más perfecto. Montaigne fue todavía más escéptico. De hecho, desde el siglo XIV la corriente del empirismo escéptico influyó fuertemente en la filosofía europea, y cumplió su tarea de dirigir la atención a las condiciones del conocimiento humano que ha producido algunas de las más importantes clarificaciones de la metodología científica.

1.2. La materia y el espacio en la física medieval tardía

Los ataques más radicales realizados contra todo el sistema de la Física se dirigían a sus doctrinas sobre la materia y el espacio y

sobre el movimiento. Aristóteles negó la posibilidad de los átomos, del vacío, del mundo infinito y de la pluralidad de mundos, pero cuando su determinismo estricto fue condenado por los teólogos en 1277 ello abrió el camino a la especulación sobre estos temas. Con la afirmación de la omnipotencia de Dios los filósofos argüían que Dios podía crear un cuerpo que se moviera en el espacio vacío o crear un universo infinito, y procedieron a investigar cuáles serían las consecuencias si El los creara. Esto parece un extraño camino para abordar la ciencia, pero no hay duda de que es hacia la ciencia a donde se dirigían. Discutieron la posibilidad de la pluralidad de mundos, de dos infinitos, y del centro de gravedad; y también discutieron la aceleración de cuerpos que caían libremente, el vuelo de proyectiles, y la posibilidad de que la Tierra tuviera movimiento. Las críticas de Aristóteles no sólo eliminaron muchas de las restricciones metafísicas y «físicas» que su sistema impuso al uso de las Matemáticas, sino que también muchos de los nuevos conceptos conseguidos fueron o incorporados directamente a la mecánica del siglo XVII o constituyeron los gérmenes de teorías que iban a ser expresadas con el nuevo lenguaje creado por las técnicas matemáticas y experimentales.

En el conjunto de las discusiones sobre la materia, el espacio y la gravitación durante los siglos XIII y XIV, fueron centrales las dos concepciones de la dimensionalidad que provenían respectivamente de los atomistas y Platón y de Aristóteles (*vide* vol. I, pp. 41-43, 75-79). En el *Timeo* Platón propuso una concepción claramente matemática del espacio, que él concebía como dimensiones

independientes de los cuerpos, pero en el que los cuerpos podían existir y moverse; el espacio era de hecho el receptáculo de todas las cosas, tan real como las ideas eternas y más real que los cuerpos que lo ocupaban. La parte del espacio ocupada por las dimensiones de un cuerpo era el «lugar» del cuerpo; la parte no ocupada era el vacío. Esta era esencialmente la concepción atomista.

Aristóteles objetaba a esta opinión en su *Física* (libro 4) que las dimensiones no podían existir separadas de cuerpos con dimensiones; concebía las dimensiones como atributos cuantitativos de los cuerpos, y ningún atributo podía existir separado de la sustancia a la que era inherente (cf. vol. I, pp. 70-72). Además, Aristóteles defendía que la concepción del espacio sostenida por Platón y los atomistas era inútil para explicar los movimientos reales de los cuerpos; por ejemplo, ¿por qué un cuerpo determinado iba de preferencia hacia arriba más que hacia abajo, o *viceversa*? Su propia explicación de los diferentes movimientos realmente observados de los cuerpos era una explicación en términos de «lugar». Este poseía dos características esenciales. Primero era el contorno físico del cuerpo, el «límite más interno» de lo que contenía el cuerpo. Aristóteles mantenía que los cuerpos que formaban el universo eran todos contiguos unos a otros, constituyendo así un *plenum*. La preferencia innata de un cuerpo por un contorno físico dentro de este *plenum* era la causa de los movimientos naturales que se observaba tenían todos los cuerpos (cf. vol. I, pp. 72-74, 108-109). A esta noción de lugar como un ambiente físico que movía a cada cuerpo según su naturaleza por causalidad final, Aristóteles

añadía también una característica geométrica del espacio. Afirmaba que cada lugar en el universo era él mismo inmóvil; y en su *De Céelo* dio a cada uno de los lugares que formaban el universo en su conjunto una posición en el espacio absoluto relativa al centro de la Tierra, considerada centro del universo. Esto le proporcionó su concepción de «arriba» y «abajo» como direcciones absolutas del centro a la circunferencia de la esfera más exterior.

Las concepciones aristotélicas de dimensionalidad y de lugar son buenos ejemplos de la concreción empírica tan notable en todo su pensamiento. Mucho del talante de la física del siglo XIV es resultado de la aplicación renovada del pensamiento más abstracto de Platón y de los atomistas.

La forma de atomismo observada en el *Timeo* de Platón y en el *De Rerum Natura* de Lucrecio (*vide infra*, p. 100), y en las obras de otros autores griegos antiguos⁷, fue desarrollada por algunos filósofos del siglo XIII. Grosetesta, por ejemplo, había dicho que el espacio finito del mundo estaba producido por la infinita «multiplicación» de puntos de luz, y consideró también el calor como debido a una dispersión de las partes moleculares consiguiente al movimiento. Incluso Roger Bacon, aunque seguía a Aristóteles e intentó mostrar que el atomismo conducía a consecuencias que contradecían las enseñanzas de la Matemática, por ejemplo, la inconmensurabilidad de la diagonal y del lado de un cuadrado (*vide* vol. I, p. 40, nota 4), estaba de acuerdo con Grosetesta al considerar el calor como una forma de movimiento violento. Hacia finales del siglo XIII varios autores adoptaron proposiciones atomistas, aunque éstas fueron

refutadas por Scoto al discutir la cuestión de si los ángeles podían moverse de un lugar a otro con movimiento continuo. También a principios del siglo XIV fueron refutadas proposiciones similares por Tomás Bradwardino (hacia 1295-1349). Las proposiciones refutadas eran que la materia continua se componía o bien de *indivisibilia*, esto es, átomos discontinuos separados unos de otros, o de *mínima*, esto es, átomos unidos unos a otros de forma continua, o de un número infinito de puntos realmente existentes.

Hacia el final del siglo XIII Gil de Roma propuso una forma completa de atomismo, que derivó su base de la teoría de Avicibrón sobre la materia como extensión especificada sucesivamente por una jerarquía de formas (*vide* vol. I, p. 75). Gil sostuvo que la magnitud podía ser considerada de tres maneras: como una abstracción matemática, como realizada en una sustancia material no específica y en una específica. Un pie cúbico abstracto y un pie cúbico de materia no específica eran entonces divisibles al infinito, pero en la división de un pie cúbico de agua se llegaba a un punto en el que cesaba de haber agua y comenzaba a haber otra cosa. Los argumentos geométricos contra la existencia de *mínima* naturales eran, por tanto, desatinados. Nicolás de Autrecourt se vio llevado, por la imposibilidad de demostrar que en un pedazo de pan había algo más allá de sus accidentes sensibles, a abandonar por completo la explicación de los fenómenos en términos de formas sustanciales y a adoptar una Física completamente epicúrea. Llegó a la conclusión probable de que un continuum material estaba compuesto de puntos mínimos, infrasensibles e indivisibles, y el

tiempo de instantes discretos, y afirmó que todo cambio en las cosas naturales se debía a movimiento local, esto es, a la agregación y a la dispersión de partículas. También creyó que la luz era un movimiento de partículas con una velocidad finita. El que algunas de estas conclusiones fueran propuestas en relación con la discusión de la doctrina teológica de la transustanciación muestra cuán estrechamente unidas estaban todas las cuestiones cosmológicas, y fue una razón de por qué fue obligado a retractarse de algunas de ellas. Estas discusiones sobrevivieron en la enseñanza nominalista de los siglos XV y XVI en las obras de Nicolás de Cusa y de Giordano Bruno (1548-1600), y condujeron finalmente a la teoría atómica que era utilizada en el siglo XVII para explicar los fenómenos químicos.

Respecto del problema del vacío, que surgió en parte de las discusiones sobre si había varios mundos —porque, si existían, ¿qué había entre ellos?—, autores de finales del siglo XIII y del comienzo del XIV, como Ricardo de Middleton (o Mediavilla, floreció hacia 1294) y Walter Burley (1275-1344), llegaron a afirmar que era una contradicción del poder infinito de Dios decir que El no podía mantener un vado real. Nicolás de Autrecourt fue más allá y afirmó la existencia probable del vado: «Hay algo en lo que no existe ningún cuerpo, pero en lo que algún cuerpo puede existir», decía en un fragmento publicado por J. R. O'Donnell en *Mediaeval Studies* (1939, vol, I, p. 218). La mayor parte de los autores aceptaron los argumentos de Aristóteles y rechazaron un vacío actualmente existente (*vide* vol. I, p. 72), aunque pudieran aceptar la descripción

del vado de Roger Bacon como abstracción matemática. «En un vacío la naturaleza no existe —decía en el *Opus Majus*, parte 5, parte I, distinción 9, capítulo 2—,

porque el vacío rectamente entendido es meramente una cantidad matemática extendida en las tres dimensiones, que existe per se sin calor ni frío, suave ni duro, raro ni denso, y sin ninguna cualidad natural, meramente ocupando el espacio, como los filósofos sostenían antes de Aristóteles, no sólo dentro de los cielos, sino más allá.»

Algunos de los argumentos físicos contra la existencia del vacío fueron tomados de griegos antiguos, como Herón y Filón, cuyos experimentos con la bujía y con el reloj de agua o clepsidra eran conocidos por varios autores, en especial Alberto Magno, Pedro de Auvemia (muerto en 1304), Juan Buridán (muerto, probablemente, en 1358) y Marsilio de Inghen (muerto en 1396). Algunos de estos autores mencionaron también otro experimento en el que se mostraba cómo subía el agua por un tubo en forma de J cuando se aspiraba el aire de la rama más larga estando la corta bajo el agua. Otro experimento se hacía con el reloj de agua, con el que se mostraba que el agua no salía por los orificios de la base cuando se tapaba con los dedos el orificio superior. Esto era contrario al movimiento natural del agua hacia abajo, y Alberto Magno lo explicó como una consecuencia de la imposibilidad del vacío, lo que significaba que el agua no podía manar si el aire no podía entrar y mantener contacto con ella. Roger Bacon no se satisfizo con esta

explicación negativa. Defendió que la causa final del fenómeno era el orden de la naturaleza, que no admitía el vacío, pero que la causa eficiente era una «fuerza de la naturaleza universal» positiva, adaptación de la «corporeidad común» de Avicibrón (*vide* vol. I, página 75), que hacía presión sobre el agua y la sostenía en alto. Esto era parecido a la explicación ya dada por Adelardo de Bath. Más tarde, Gil de Roma propuso otra fuerza positiva, *tractatus a vacuo* o succión por el vacío, una atracción universal que mantenía los cuerpos en contacto y evitaba la discontinuidad. Afirmaba que la misma fuerza era la causa de que el imán atrajera el hierro. Otro autor del siglo XIV, Juan de Dumbleton (floreció hacia 1331-1349), decía que los cuerpos celestes para mantener el contacto abandonarían, si fuera necesario, sus movimientos naturales circulares en cuanto cuerpos determinados y seguirían su naturaleza universal, o «corporeidad», incluso aunque esto implicara un movimiento rectilíneo antinatural. En los siglos XV y XVI la teoría de Roger Bacon fue olvidada por completo y resumida en la expresión «la naturaleza aborrece el vacío», que provocó los sarcasmos de Torricelli y Pascal.

La posibilidad tanto de la adición infinita como de la división infinita de la magnitud condujo a discusiones interesantes sobre las bases lógicas de las Matemáticas. Ricardo de Middleton y, más tarde, Ockham afirmaron que no se podía asignar un límite al tamaño del universo y que éste era potencialmente infinito (*vide* vol. I, p. 75) No era infinito realmente, pues ningún cuerpo sensible podía serlo. Ricardo de Middleton intentó demostrar que esta última conclusión

era incompatible con la doctrina de Aristóteles sobre la eternidad del universo, que Alberto Magno y Tomás de Aquino afirmaron era imposible demostrarla o destruirla por la sola razón, pero que debía negarse según la revelación. Ricardo decía que como continuamente se estaban engendrando almas humanas indestructibles, si el universo existiera desde la eternidad habría ahora una multitud infinita de esos seres. Una multitud realmente infinita no podía existir; por tanto, el universo no existía desde la eternidad. Toda la discusión llevó a un examen del significado de infinito. El desarrollo de las paradojas geométricas que surgirían de la afirmación categórica de un infinito existente realmente, tal como en la discusión de Alberto de Sajonia sobre si habría una línea espiral infinita en un cuerpo infinito, condujo a Gregorio de Rimini (1344) a intentar dar una significación precisa a las palabras «todo», «parte», «más grande», «menos». Señaló que ellas tenían un significado diferente cuando se referían a magnitudes finitas o infinitas, y que «infinito» tenía una significación distinta según que fuera tomada en un sentido distributivo o colectivo. Este problema fue tratado en el *Centiloquium Theologicum* atribuido antes a Ockham, pero que es de un autor desconocido. La conclusión 17, C, muestra que el autor había alcanzado una sutilidad lógica que iba a ser recobrada únicamente en el siglo XIX y en el XX con la lógica matemática de Cantor, Dedekind y Russell.

No hay objeción a que la parte sea igual al todo, o a que no sea menor, porque esto se halla, no... sólo intensiva, sino extensivamente... porque en todo universo no hay más partes que

en una habichuela, porque en una habichuela hay un número infinito de partes.

Estas discusiones sobre el infinito y otros problemas, como el de la máxima resistencia que una fuerza podía vencer y la mínima que no podía superar, pusieron las bases lógicas del cálculo infinitesimal. La matemática medieval era de alcance limitado, y solamente cuando los humanistas atrajeron la atención sobre la matemática griega, y en particular sobre Arquímedes, se convirtieron en una posibilidad los progresos que tuvieron lugar en el siglo XVII.

El problema de la pluralidad de mundos estaba asociado con el de la magnitud infinita. En 1277 el obispo de París, Etienne Tempier, condenó la proposición de que era imposible para Dios crear más de un universo. Habitualmente el problema era tratado en conexión con el de la gravedad y el del lugar natural de los elementos (*vide* vol. I, pp. 77-78, 121).

Aristóteles, en su *De Cielo* (libro 1, capítulo 8), consideró brevemente la posibilidad de una explicación mecánica de la gravitación por medio de fuerzas externas que atraían o empujaban a los cuerpos, pero la rechazó sobre la base de que era innecesaria dentro de la concepción completa de que los movimientos de gravedad y levitación eran movimientos espontáneos de una «naturaleza» hacia su lugar natural (cf. vol. I, p. 72; *infra*, pp. 50 y ss.). Fue a esta opinión a la que Averroes prestó su autoridad, haciendo de la gravedad una tendencia *intrínseca* que pertenecía a la «naturaleza» o «forma» de un cuerpo y que causaba así el movimiento. Este concepto de la gravedad y de la levitación como

propiedades intrínsecas que causaban el movimiento natural se hizo habitual en el siglo XIII, fue aceptada, por ejemplo, por Alberto Magno y Tomás de Aquino, aunque las opiniones difirieran respecto a la manera concreta en que la «forma» hacía que un cuerpo se moviera.

Sin embargo, ya en el siglo XIII hubo filósofos de la naturaleza que defendieron que, más allá de la espontaneidad natural de la forma y de la causalidad final del lugar natural, era necesario buscar otra causalidad eficiente de la gravitación. Algunos autores la concibieron como una causa *externa*. Buenaventura y Ricardo de Middleton, por ejemplo, sugirieron que una fuerza atractiva (*virtus loct attrahentis*) debía ser atribuida al lugar natural, y una fuerza expulsora, al lugar no natural. Roger Bacon desarrolló una teoría completa del «campo» para explicar la gravitación (cf. vol. I, pp. 74-76, 9699; *infra*, p. 89). Propuso que el lugar natural ejercía no solamente una causalidad final, sino también una causalidad eficiente por medio de una *virtus immaterialis*, fuerza inmaterial que provenía de los cuerpos celestes y que llenaba todo el espacio. La gravedad y la levedad eran fuerzas inmateriales difusas que, aunque se derivaban de la «virtud celeste», producían sus efectos al concentrarse más intensamente en varios lugares naturales. Esta explicación se encuentra también en la *Summa Philosophiae* del pseudo-Grosetesta.

Una forma aún más extrema de esta explicación por medio de fuerzas extremas parece haber sido propuesta por algunos autores del siglo XIV que concibieron el lugar natural como la causa

eficiente total de la gravitación. Por ejemplo, Buridán, en sus *Quaestiones de Céelo et Mundo* (libro 2, cuestión 12), menciona la opinión de «algunos» (*aliqui*) que «dicen que el lugar es la causa motriz del cuerpo pesado por medio de la atracción, de la misma manera que el imán atrae al hierro». Buridán atacó esta opinión basándose en la experiencia. Puesto que los cuerpos pesados aceleran su movimiento cuando caen, decía, debe haber un aumento en la causa motriz proporcionado al aumento de velocidad (cf. vol. I, pp. 77, 108-109; *infra*, pp. 67 y ss.). Quienes suponían que la fuerza motriz era la atracción ejercida por el lugar natural debían suponer, por tanto, que ésta es mayor en la proximidad del lugar natural que lejos de él, como sucedía con el imán. Pero si se dejan caer dos piedras desde una torre, una desde el punto más alto y otra desde más abajo, la primera tiene mayor velocidad que la segunda cuando ambas han llegado, por ejemplo, a un punto que dista un pie del suelo. Por tanto, no es meramente la proximidad al lugar natural lo que determina la velocidad, sino que, cualquiera que sea la causa, la velocidad depende de la longitud de la caída. «Ni esto es semejante al imán y al hierro —concluía— porque si el hierro está próximo al imán, inmediatamente comienza a moverse más aprisa que si estuviera más alejado; pero éste no es el caso de los cuerpos pesados respecto a su lugar natural»⁸.

Alberto de Sajonia (hacia 1316-1390) hizo una objeción más a que el lugar natural ejerciera cualquier tipo de fuerza, cualquier *vis trahens* sobre el cuerpo que se movía hacia él. Señaló que a tal fuerza un cuerpo más pesado podría ofrecer una resistencia mayor

que un cuerpo ligero y que de ese modo podría caer más lentamente que un cuerpo más ligero, lo que era contrario a la experiencia.

Estos argumentos son buenos ejemplos de la extrema dificultad que los problemas dinámicos, cuya solución no se daba por supuesta, presentaban a los primeros que los abordaron.

Todos estos autores aceptaron el principio de que la acción a distancia estrictamente dicha era imposible, y los que proponían la analogía del imán tenían en su mente la explicación dada por Averroes de esa acción (*vide* vol. I, p. 115). Según esta teoría la fuerza que movía al hierro era una cualidad inducida en él por la *species magnética* que salía del imán a través del medio y alteraba al hierro, dándole así el poder de *moverse a sí mismo*. De este modo se conservaba el principio esencial de la dinámica aristotélica, que el poder motor debe acompañar al cuerpo que se mueve.

Guillermo Ockham fue una excepción. Arguyendo que las *species* intermedias y los agentes postulados meramente para evitar tener que aceptar la acción a distancia eran innecesarios para «salvar las apariencias», declaró abiertamente que no había objeciones a la acción a distancia en cuanto tal. El sol al iluminar la tierra actuaba inmediatamente a distancia. El imán, afirmaba en su *Comentario a las sentencias* (libro 2, cuestión 18), «atrae [al hierro] inmediatamente y no por medio de un poder existente en alguna forma en el medio o en el hierro; por tanto, el imán actúa a distancia inmediatamente y no a través de un medio». Respecto al principio general de que la fuerza motriz debía acompañar al cuerpo que se mueve, el ataque de Ockham al conjunto de la concepción de

su tiempo sobre el movimiento negó absolutamente esto como una pirámide de las explicaciones dinámicas (*vide infra*, pp. 63-68).

Por lo menos otro autor del siglo XIV, Juan Baconthorpe, siguió a Ockham al aceptar la posibilidad de la acción a distancia, afirmaba, como cita la doctora Maier en su libro *An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft* (p. 176, nota), que el imán «atrae efectivamente al hierro». Pero la opinión habitual sobre la gravitación en el siglo XIV, como en el XIII, rechazaba tanto la acción a distancia como las fuerzas externas de cualquier tipo y adoptó las ideas de Aristóteles y Averroes de una tendencia intrínseca. Esta fue la opinión, por ejemplo, de Juan de Jandum, Walter de Burley, Buridán, Alberto de Sajonia y Marsilio de Inghen. El intento de Buridán y otros para dar precisión cuantitativa a esta causa intrínseca del movimiento condujo a las teorías dinámicas más interesantes antes de Galileo (*vide infra*, pp. 67 y ss., 139 y ss.). Surgió entonces el problema de ¿cuál era la causa natural de que un elemento, por ejemplo, la tierra, llegara a estar en reposo en ella? Alberto de Sajonia (hacia 1316-1390) distinguió, al tratar este problema, entre el centro del volumen y el centro de gravedad. El peso de cada trozo de materia se concentraba en su centro de gravedad, y la tierra estaba en su lugar natural cuando su centro de gravedad estaba en el centro del universo. El lugar natural del agua estaba en una esfera que rodeaba la tierra, de forma que no ejercía presión sobre la superficie de la tierra a la que cubría.

Aunque aristotélicos como Buridán y Alberto de Sajonia rechazaron la explicación de la gravedad por medio de fuerzas externas, la

explicación aristotélica no era la única en ocupar el campo. Con el renacimiento del platonismo, especialmente en el siglo XV, se encontró un argumento para defender la existencia de varios mundos en el concepto de la gravedad de los pitagóricos y de Platón. Heráclides de Ponto y los pitagóricos defienden que cada una de las estrellas constituye un mundo, consistente en una tierra rodeada de aire, y que el conjunto flota en el éter sin límite, dijo el autor griego Joannes Stobaeus, del siglo v d. C., en su *Eclogarum Physicorum*, capítulo 24. La teoría de la gravedad derivada del Timeo afirmaba que el movimiento natural de un cuerpo era unirse al elemento al cual pertenecía, en cualquier mundo que estuviera, mientras que el movimiento violento tenía el efecto opuesto (*vide* vol. I, pp. 41-42). Esta explicación de la gravedad como la tendencia de todos los cuerpos semejantes a congregarse, como inclinado *ad sitnile*, fue adoptada generalmente por los que rechazaban la concepción aristotélica del espacio absoluto. Así perdió su fuerza la objeción aristotélica de que si había pluralidad de mundos no habría lugar natural. La materia podía meramente tender a moverse hacia el mundo más cercano a ella. Esta teoría fue mencionada por Juan Buridán, que era él mismo un crítico del espacio absoluto de Aristóteles, aunque no, por supuesto, de su concepto de lugar natural. Fue adoptada por Nicolás Oresme (*vide infra*, páginas 67, 73-82) y más tarde por el platónico más importante del siglo XV, Nicolás de Cusa, que decía que la gravitación era un fenómeno local y cada estrella un centro de atracción capaz de conservar unidas sus partes. Nicolás de Cusa creyó también que cada estrella tenía

sus habitantes, como los tenía la tierra. Alberto de Sajonia conservó la estructura esencial del universo aristotélico; Ockham, aunque defendía como Avicibrón que la materia de los cuerpos elementales y celestes era la misma, decía que solamente Dios podía corromper la sustancia celeste. Nicolás de Cusa decía que no había absolutamente ninguna distinción entre la materia celeste y la sublunar, y que debido a que el universo, sin ser infinito en acto, no tenía fronteras, ni la tierra ni ningún otro cuerpo podía ser su centro. No había centro. Cada estrella, nuestra tierra era una de ellas, consistía en los cuatro elementos dispuestos concéntricamente alrededor de una tierra central y cada una estaba suspendida por separado en el espacio ilimitable por el exacto equilibrio de sus elementos ligeros y pesados.

1.3. Dinámica terrestre y celeste

La dinámica de Aristóteles incluía varias proposiciones que fueron todas ellas criticadas al final de la Edad Media. En primer lugar estaba la concepción aristotélica del movimiento local, como todos los tipos de cambio, como un proceso por el que las potencialidades de cualquier cuerpo para moverse eran actualizadas por un agente motor (vide vol. I, pp. 71-72, 77, 108). En el movimiento natural este agente era un principio intrínseco, que actuaba o como una causa eficiente, por ejemplo, el «alma» en los seres vivos (cf. vol. I, p. 130), o como un principio que producía el movimiento espontáneo característico en un medio determinado, como en el movimiento de los cuerpos hacia su «lugar natural». Cada una de las esferas era

movida también por un «alma», que se convirtió en autores posteriores en una «Inteligencia» que hacía girar a la esfera. En el movimiento no natural, o forzado y «violento», el agente era siempre una causa externa que acompañaba al cuerpo en movimiento e imponía sobre él su forma ajena de movimiento. Pero tanto si el movimiento era producido por la actividad natural de la «naturaleza» o «forma» como si era impuesto por un agente externo se conservaba el principio general: «Todo lo que se mueve es movido por algo.» Si la causa cesaba en su acción también hacía el efecto. Para el conjunto de la concepción del movimiento natural era básico el que se dirigiera hacia un fin, una meta, por ejemplo, la tierra, como meta de una piedra que cae libremente. El movimiento no natural era la imposición de un movimiento ajeno al fin natural, y ese movimiento persistía solamente mientras el agente externo se mantenía en contacto con el cuerpo movido. Aristóteles defendió además que la velocidad de un cuerpo en movimiento era directamente proporcional a la fuerza motriz e inversamente proporcional a la resistencia del medio en el que tenía lugar el movimiento. Esto daba la ley,

$$\text{Velocidad } (v) \propto \frac{\text{fuerza motriz } (f)}{\text{resistencia } (r)}$$

Una limitación importante, que provenía del concepto griego de la proporción y de la formulación vaga de Aristóteles, era el que el mismo Aristóteles no expresó de hecho su «ley» en la forma en que,

por comodidad, se ha expresado anteriormente. Según el concepto griego, una magnitud podía resultar solamente de una proporción «verdadera», esto es, de una razón entre cantidades «comparables», por ejemplo, entre dos distancias o dos tiempos. Una proporción entre dos cantidades «no comparables» como la distancia (d) y el tiempo (t) no habría sido considerada, por tanto, como una magnitud, de ese modo los griegos no dieron de hecho una definición métrica de la velocidad como una magnitud que representa una razón entre el espacio y el tiempo, por ejemplo, $v = K d/t$. Esa definición métrica fue una de las realizaciones de los matemáticos escolásticos del siglo XIV. El mismo Aristóteles pudo expresar la relación de la velocidad a la fuerza y a la resistencia solamente si hubiera abordado el problema por etapas separadas.

Así:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1}{t_2}$$

por ejemplo, la velocidad es uniforme cuando

$$f_1 = f_2 \quad \text{y} \quad r_1 = r_2$$

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad \text{cuando } t_1 = t_2 \text{ y } r_1 = r_2$$

y

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{cuando } t_1 = t_2 \text{ y } f_1 = f_2$$

La «ley» de Aristóteles expresaba su creencia de que cualquier incremento de la velocidad en un medio dado podía ser producido solamente por un incremento de la fuerza motriz. De la «ley» se seguía también que en el vacío los cuerpos caerían con velocidad instantánea; como él consideró esta conclusión como absurda, la utilizó como un argumento contra la posibilidad del vacío. Sostuvo que en un medio dado los cuerpos de distinta materia, pero de la misma forma y tamaño, caían con velocidades proporcionales a sus pesos diferentes.

Este concepto y clasificación del movimiento se basaba en la observación directa y era confirmado por muchos fenómenos cotidianos. Pero había tres fenómenos que presentaban dificultades y que iban, en último término, a resultar fatales para la formación matemática sacada de la explicación de Aristóteles. Primero, 'según la «ley» de Aristóteles, debería haber una velocidad finita (v) para cualquier valor finito de la fuerza (f) y de la resistencia (r); sin embargo, de hecho, si la fuerza era menor que la resistencia, no podría mover en absoluto el cuerpo. El mismo Aristóteles reconoció esto e hizo excepciones para su ley, por ejemplo, en el caso de un hombre que intenta mover un peso considerable sin conseguirlo.

Segundo, ¿cuál era la fuente del incremento de la fuerza motriz exigido para producir la aceleración de los cuerpos en caída libre?

El había observado que los cuerpos que caen verticalmente en el aire aceleraban constantemente, y pensó que esto se debía a que el cuerpo se movía más rápidamente cuando se acercaba a su lugar natural en el universo como meta y cumplimiento de su movimiento natural.

Tercero, ¿cuál era la fuerza motriz que mantenía en movimiento un proyectil cuando éste había abandonado al agente de la proyección? Si el movimiento hacia arriba de una piedra no era debido a la misma piedra, sino a la mano que la lanzaba, ¿cuál era el responsable de su movimiento continuado después de que cesara de estar en contacto con la mano? ¿Qué mantenía en vuelo una flecha después de que había abandonado la cuerda del arco? El mismo Aristóteles, en la *Física* (libro 8), propuso este problema y discutió tres soluciones, las de Platón y la suya propia. Platón, en el *Timeo*, daba a los cuerpos solamente un movimiento propio, que les dirigía hacia su lugar propio en el espacio que formaba el receptáculo de todas las cosas, y explicaba este movimiento por la forma geométrica de los cuerpos elementales y el sacudimiento del receptáculo por el Alma del Mundo. Atribuía todos los demás movimientos a la colisión y a la mutua sustitución, *antiperistasis*: un proyectil, por ejemplo, en el momento de la descarga, comprimía el aire que estaba frente a él, que circulaba entonces a la parte posterior del proyectil y lo empujaba hacia adelante, y así sucesivamente en un remolino. La objeción de Aristóteles a esta explicación era que, a menos que el motor original diera a lo que movía no solamente un movimiento, sino también el poder de

moverse a sí mismo, el movimiento cesaría. Por tanto, propuso que la cuerda del arco o la mano comunicaba una cierta cualidad o «poder de ser un moviente» (como dijo en el libro 8, capítulo 10, de la *Física*, 267 a 4) al aire que estaba en contacto con ella, que transmitía el impulso al estrato siguiente de aire, y así sucesivamente, conservando la flecha en movimiento hasta que la fuerza decaía progresivamente. Esta fuerza, decía, proviene del hecho de que el aire (y el agua), siendo elementos intermedios, eran pesados o ligeros, según su medio ambiente efectivo. El aire podía mover así un proyectil hacia arriba a partir de su posición natural. Si el espacio actual fuera un vacío, argüía en el libro 4 de la *Física*, ni aun el movimiento violento sería posible; un proyectil no podría moverse en el espacio vacío.

Gimo se ha visto a la luz de la mecánica clásica elaborada en el siglo XVII, el defecto principal de la mecánica de Aristóteles residía en su incapacidad de tratar adecuadamente la *aceleración*, en cuanto distinta de la velocidad. Desde el punto de vista de estas últimas concepciones, su dificultad fundamental surgió del hecho de que, al analizar el movimiento enteramente en términos de velocidades que se continúan durante un período de tiempo, era incapaz de reconocer la velocidad *inicial* o la fuerza requerida para *comenzar* el movimiento de un cuerpo. Sus ideas de fuerza o poder se limitaban a las causas de movimientos que continuaban durante un período de tiempo. Todas las dificultades halladas en su manera de tratarlas fueron finalmente vencidas, cuando se analizó el movimiento en términos de velocidad *en un instante*. Newton fue capaz, utilizando

este concepto, de demostrar que la misma fuerza inicial que ponía en movimiento un cuerpo debía, si continuaba actuando, producir no precisamente una velocidad continuada, sino el mismo cambio constante en velocidad, esto es, una aceleración constante. Los progresos hacia la clarificación de este problema que se hicieron antes de Newton los veremos a continuación.

Algunas partes de la dinámica de Aristóteles ya fueron criticadas en el Mundo Antiguo por miembros de otras escuelas de pensamiento. Los atomistas griegos consideraron como un axioma el que todos los cuerpos de cualquier peso caerían en el vacío a la misma velocidad y que las diferencias en la velocidad de cuerpos determinados en un medio determinado, por ejemplo, el aire, se debían a las diferencias en la proporción de la resistencia a los pesos (*vide supra*, p. 41, nota 1). Los mecanicistas alejandrinos y los estoicos admitieron también la posibilidad del vacío; pero Filón decía que las diferencias en la velocidad de la caída eran debidas a diferentes «pesos-fuerzas» (correspondientes a diferentes «masas»), y ahí derivó Herón el corolario de que si dos cuerpos de un peso determinado se fundían, la velocidad de la caída del cuerpo resultante sería mayor que la de cada uno de ellos por separado. El neoplatónico cristiano Juan Filopón de Alejandría, que escribió en el siglo vi d. C., rechazó también las leyes de Aristóteles y de los atomistas sobre la caída de los cuerpos y defendía que en el vacío un cuerpo caería con una velocidad finita característica de su gravedad, mientras que en el aire esta velocidad finita se veía reducida en proporción a la resistencia del medio. La rotación de las esferas celestes

proporcionaba un ejemplo de una velocidad finita que tenía lugar en la ausencia de resistencia. Filopón señaló también que la velocidad de los cuerpos que caen en el aire no era simplemente proporcional a sus pesos, porque cuando un cuerpo pesado y otro menos pesado eran dejados caer desde la misma altura, la diferencia entre sus tiempos de caída era mucho menor que la que existía entre sus pesos. Filopón aceptó la teoría de Aristóteles para explicar la aceleración continuada de los cuerpos que caen, aunque ésta no fue aceptada por otros físicos griegos posteriores. Algunos de éstos propusieron una adaptación del concepto platónico de la *antiperistasis*, según la cual el cuerpo que caía forzaba al aire hacia abajo, que a su vez arrastraba al cuerpo tras él, y así sucesivamente; la gravedad natural recibía continuamente así una ayuda creciente de la atracción del aire y provocaba continuamente un incremento de esta ayuda.

Parece que Filopón fue el primero en demostrar que el medio no podía ser la causa del movimiento del proyectil. Si es realmente el aire el que transporta la piedra o la flecha, ¿por qué, preguntaba, debe la mano tocar la piedra, o la flecha debía ser acoplada al arco? ¿Por qué el batir violento del aire no movía la piedra? ¿Por qué una piedra pesada puede ser lanzada más lejos que una ligera? ¿Por qué dos cuerpos tienen que chocar para desviarse y no pasan simplemente uno cerca del otro en el aire? Estas observaciones cotidianas, que iban a formar el componente principal de las críticas a la dinámica de Aristóteles hasta el tiempo de Galileo, llevaron a Filopón a que propusiera una explicación alternativa del movimiento

«forzado» de los proyectiles. Obviamente, el aire no producía el movimiento, sino que oponía resistencia a él. Propuso la idea original de que el instrumento de proyección impartía poder motor no al aire, sino al mismo proyectil; «una cierta fuerza motriz incorpórea debe ser dada al proyectil a través del acto de lanzar», decía en su comentario a la *Física* de Aristóteles (libro 4, capítulo 8). Pero esta fuerza motriz, o «energía» (*energeia*), era solamente prestada y decrecía según las tendencias naturales del cuerpo y la resistencia del medio, de manera que el movimiento no natural del proyectil terminaba por cesar.

Algunos investigadores, particularmente Duhem, han aducido la teoría de Filopón como el origen de ciertas concepciones medievales que a su vez se ha supuesto que dieron nacimiento al concepto moderno de la inercia, que iba a ser la base de la revolución de la Dinámica en el siglo XVII (*vide infra* p. 66, nota 11). Veremos todavía más adelante que esta opinión de la continuidad completa puede ser puesta en duda basándose tanto en la derivación histórica efectiva como en el carácter de la concepción del movimiento en cuestión. Pero la teoría de que el movimiento no natural podía ser mantenido por una fuerza motriz impartida al mismo cuerpo que se movía antinaturalmente era una innovación importante y fue mencionada por varios autores antes de que reapareciera como la teoría del *Impetus* en el siglo XIV. El mismo Filopón fue atacado por Simplicio (muerto en 549) en las «Digresiones contra Juan el Gramático», que añadió como apéndice a su propio comentario a la *Física*. Específicamente objetaba la negación de Filopón del principio

fundamental de que todo lo que era movido antinaturalmente debía ser movido por un agente externo en contacto con él. Su propia explicación del movimiento del proyectil era un desarrollo de la teoría de la *antiperistasis*; defendía que el proyectil y el medio actuaban alternativamente uno sobre otro hasta que, finalmente, se extinguía la fuerza motriz. Al mismo tiempo, propuso una explicación de la aceleración de los cuerpos que caen libremente, suponiendo que su peso aumentaba en la medida que se aproximaban al centro del mundo.

Uno de los primeros autores árabes que adoptó la teoría de Filopón fue Avicena, que definió la fuerza impartida al proyectil, según la traducción hecha por S. Pines en un artículo importante en *Archeion* (1938, vol. XXI, p. 301), como «una cualidad por la que el cuerpo empuja lo que le impide moverse en cualquier dirección». También llamó a esto una «fuerza prestada», una cualidad dada al proyectil por el proyector, como el calor era dado al agua por el fuego. Avicena hizo dos modificaciones importantes de la teoría. Primero, mientras Filopón había defendido que aun en el vacío, si éste fuera posible, la fuerza prestada desaparecería progresivamente y cesaría el movimiento «forzado» del proyectil, Avicena argüía que, en ausencia de obstáculos, este poder y el movimiento «forzado» que producía persistirían indefinidamente. Segundo, intentó expresar la fuerza motriz cuantitativamente, diciendo, en efecto, que los cuerpos movidos por una fuerza determinada se trasladarían con velocidades inversamente proporcionales a sus pesos y que los cuerpos que se movían con una velocidad determinada recorrerían

(contra la resistencia del aire) distancias directamente proporcionales a sus pesos. Un perfeccionamiento ulterior de la teoría fue realizado por el seguidor de Avicena Abu'l Barakat, en el siglo XII, que propuso una explicación de la aceleración de los cuerpos que caen por la acumulación de incrementos sucesivos de fuerza con incrementos sucesivos de velocidad.

Los principales puntos en litigio entre la concepción aristotélica del movimiento y esta concepción, en último extremo platónica, expuesta por primera vez por Filopón, fueron recogidos por Averroes en un estudio que iba a determinar las líneas principales del debate que comenzó en Occidente en el siglo XIII. Filopón sostenía que en todos los casos, en los cuerpos que caen y en los proyectiles, la velocidad era proporcional solamente a la fuerza motriz y que la resistencia del medio únicamente reducía ésta en una velocidad finita determinada. Esta «ley del movimiento» fue defendida por el árabe español del siglo XII Ibn Bagda, o Avempace, como era llamado en latín, como una alternativa de la de Aristóteles. Significaba cambiar la «ley del movimiento» de Aristóteles por la fórmula: velocidad (v) = fuerza (f) — resistencia (r). Avempace argumentaba que incluso en el vacío un cuerpo se movería con una velocidad finita porque, aunque no había resistencia, el cuerpo tenía todavía que atravesar una *distancia*. Citó, como Filopón, el movimiento de las esferas celestes como un ejemplo de velocidad finita sin resistencia. Averroes, en su comentario a la *Física* de Aristóteles, no sólo atacó la exposición del movimiento de Avempace (que él creyó que era original), sino toda la doctrina de las

«naturalezas» sobre la que estaba basada. Sostenía que el error de Avempace consistía en tratar la «naturaleza» de un cuerpo pesado como si fuera una entidad distinta de la materia del cuerpo y como si la materia fuera movida por la «forma» que actuaba como una causa eficiente, de la misma manera que una Inteligencia inmaterial movía su esfera celeste o el «alma» producía los movimientos de un ser vivo. Averroes atacaba específicamente la hipótesis de Avempace de que el medio era un impedimento para el movimiento natural, porque esto quería decir que todos los cuerpos reales se movían antinaturalmente, ya que todos, de hecho, se movían a través de medios corpóreos.

El punto de partida normal de los comentaristas escolásticos de la *Física* y del *De Caelo* de Aristóteles fueron los comentarios de Averroes que acompañaban a las primeras traducciones latinas más populares. De ese modo, la exposición de Averroes y su crítica de Avempace se convirtió en la fuente de una profunda divergencia en los intentos de formular una ley de las velocidades de los movimientos naturales. Pero significó más que esto. Se ha pretendido que ella reflejaba una profunda hendidura en la concepción de la naturaleza que corre a lo largo de toda la historia de la Filosofía⁹. Filopón y Avempace habían seguido a Platón al buscar las naturalezas reales y las causas de los fenómenos no en la experiencia inmediata, sino en factores abstraídos por la razón a partir de la experiencia. Podía suceder que todos los cuerpos observados se movían de hecho a través de un medio; sin embargo, se había de buscar la *ley* de sus movimientos no en la experiencia

inmediata, sino por medio de un análisis abstracto que descubriría el mundo real inteligible como una idealización del que la polifacética diversidad del mundo de la experiencia era un producto compuesto y en cierto sentido la «apariencia». Averroes, en contra de esta opinión, identificó el mundo real con el mundo concreto y directamente observable, y buscó la ley del movimiento de acuerdo con los datos de la experiencia en toda su diversidad inmediata.

La conclusión de la línea de argumentación de Averroes sería atribuir los factores abstractos aparecidos por el análisis de la experiencia inmediata a nuestro modo de pensar más que a las cosas analizadas; considerar estos factores como meros conceptos o incluso nombres, no como el descubrimiento de algo real. Esta fue la disputa entre los «nominalistas» y los «realistas» en la Edad Media y la de los «empiristas» y los «racionalistas» en los siglos XVII y XVIII. Y significa una profunda diferencia no sólo en la filosofía de la naturaleza, sino también en el método científico. Es verdad que Averroes y sus seguidores occidentales consideraron a su empirismo estricto como una expresión auténtica de los métodos aristotélicos, mientras que Avempace era calificado de platónico por Alberto Magno y Tomás de Aquino, y Galileo iba a proclamar su método de idealización matemática como un triunfo de Platón sobre Aristóteles. Los métodos aplicados por ambos bandos del debate en el siglo XIII y XIV puede ser mirado desde estos dos puntos de vista, aunque las contribuciones positivas al problema del movimiento no vinieron, por ningún concepto, todas del mismo bando.

En el siglo XIII fueron principalmente las disputas filosóficas las que

determinaron los términos de la discusión del movimiento pero esto dio lugar en el siglo XIV a una mayor atención a la formulación matemática y cuantitativa de las leyes del movimiento. Comenzó a dirigirse la atención del «porqué» al «cómo». Los filósofos de la naturaleza de este período, prácticamente sin ninguna excepción - la más significativa fue la de Guillermo Ockham, basaron sus discusiones sobre el principio aceptado de Aristóteles de^ que el estar en movimiento significaba ser movido por algo. Había diferencias de opinión respecto de la naturaleza de la fuerza motriz, según los diferentes casos, y respecto de las relaciones cuantitativas que existían entre los diferentes determinantes de la velocidad.

El primer filósofo escolástico que recogió la discusión entre Averroes y Avempace fue Alberto Magno. Se puso del lado de Averroes, y en eso fue seguido por Gil de Roma y otros, hasta que en el siglo XIV Tomás Bradwardino propuso una versión original de la «ley» aristotélica que expresaba la proporcionalidad entre la velocidad, la fuerza y la resistencia. Averroes había recogido las propias observaciones de Aristóteles sobre la ley $v \propto f/r$ en el caso en que la fuerza no podía superar a la resistencia y producir algún movimiento (*vide supra* p. 51). Intentó superar esta dificultad diciendo que la velocidad se seguía del exceso de la fuerza respecto de la resistencia, y algunos autores latinos del siglo XIII supusieron que el movimiento se producía solamente cuando f/r era mayor que la unidad. Tomás Bradwardino, en su *Tractatus Proportionum* (1328), limitó las comparaciones de las proporciones de la fuerza a la resistencia a los casos en que ocurría así. En lo que parece ser

uno de los intentos más antiguos de utilizar funciones algebraicas para describir el movimiento, intentó demostrar cómo la variable dependiente estaba relacionada a las dos variables independientes f y r .

La formulación métrica de la «ley del movimiento» aristotélica como una función, de manera que fuera refutable cuantitativamente, fue una conquista de la mayor importancia, incluso aunque ni Bradwardino ni ninguno de sus contemporáneos descubriera una expresión que se adecuara a hechos o no aplicara de hecho ninguna comparación cuantitativa. El primer requisito era dar una definición métrica de la velocidad como una magnitud que representara la razón entre el espacio y el tiempo. Aristóteles no sólo había fracasado en esto, sino que también su método de expresión no había distinguido claramente el análisis estático de la relación entre la fuerza (f), resistencia (r) y la distancia (d), en el que no se consideraba el tiempo (t), por ejemplo, al tratar la elevación de pesos, del análisis dinámico-cinemático en el que se considera el tiempo (cf. vol. I, p. 109). Al menos en Occidente, parece que el primer autor en intentar un análisis puramente cinemático del movimiento fue Gerardo de Bruselas, cuyo importante tratado *De Motu* fue escrito, según Clagett, probablemente entre 1187 y 1260. Este tratado parece estar relacionado en alguna forma con las actividades de Jordano y muestra la fuerte influencia de Euclides y Arquímedes, utilizando la prueba característica de este último por la *reductio ad absurdum* (o prueba *per impossibile*) y el método de eliminación de todas las posibilidades. Al tratar el tema de los

movimientos de rotación, Gerardo adoptó un enfoque que se ha convertido en característico de la cinemática moderna, considerando como objetivo principal del análisis la representación de las velocidades no-uniformes por medio de velocidades uniformes. Aunque le faltó poco para definir la velocidad como una razón de cantidades no comparables, su análisis implicaba inevitablemente el concepto de velocidad, y parece que supuso que la velocidad de un movimiento puede ser expresada por un número o una cantidad haciendo de ella una magnitud como el espacio o el tiempo. Bradwardino discute específicamente algunas proposiciones de Gerardo, y parece probable que el *De Motu* dirigiera la atención de los matemáticos de Oxford del siglo XIV hacia la descripción cinemática de los movimientos variables y hacia la definición métrica de la velocidad exigida para su estudio (cf. *infra* pp. 125 y ss.).

Bradwardino fue capaz, utilizando su formulación métrica, de demostrar que el análisis de Aristóteles y otras varias fórmulas corrientes, incluida la de Avempace, no se adecuaban a los hechos de los cuerpos en *movimiento*, tal como él los entendía. Rechazó todas ellas porque no satisfacían sus presupuestos físicos o no se conservaban para todos los valores. En lugar de ellos, propuso una interpretación de la ley de Aristóteles basada sobre el teorema que aparecía en el comentario de Campanus de Novara al quinto libro de Euclides, en el que se demostraba que si $a/b = b/c$, entonces $a/c = (b/c)^2$. Bradwardino argumentó que la ley de Aristóteles significaba que si una razón dada f/r producía una velocidad v , la razón que

haría doble esta velocidad no era $2f/r$, sino $(f/r)^2$ y la razón que la reduciría a la mitad era $\sqrt{f/r}$. La función exponencial por la que relacionó estas variables puede ser expresada en la terminología moderna como $v = \log (f/r)$. Puesto que logaritmo de 1/1 es 0, la condición se cumple cuando la fuerza y la resistencia son iguales, no hay entonces ningún movimiento y la fórmula da un cambio gradual continuo en la medida en que tanto v como f/r se aproximan a la unidad. Aunque el enfoque de la dinámica de Bradwardino tenía el grave defecto (no era por ningún concepto, el único en este período) de que no comprobó su ley haciendo experimentos, su formulación del problema en términos de una ecuación en la que se reconocía la complejidad de las relaciones implicadas. Una contribución importante a los métodos de la física matemática. Su sustitución del «porqué» por el «cómo» en la base del estudio del movimiento tuvo una influencia inmediata y duradera. Su ecuación fue aceptada por los matemáticos de Oxford, Heytesbury, Dumbleton y Ricardo de Swineshead (*vide infra*, página 124), y por Buridán, Alberto de Sajonia y Nicolás de Oresme, y hasta el siglo XIV fue tenida casi universalmente como la auténtica «ley del movimiento» aristotélica.

El crítico más antiguo y más importante de la «ley del movimiento» de Aristóteles, según el punto de vista de Avempace, fue Tomás de Aquino. El principal punto en litigio era si un cuerpo se movería con una velocidad finita en el vacío. El Aquinate, en su comentario a la *Física*, apoyó el argumento de Avempace de que aun sin ninguna resistencia, todo movimiento debía necesitar tiempo porque

atravesaba una distancia extensa. Por tanto, aceptó la «ley» de Avempace, $v = f - r$. Estaba incluso dispuesto a admitir la afirmación de Averroes de que esto implicaría un «elemento de violencia» en todos los movimientos naturales efectivos, porque *todos partían* de un lugar no natural. Roger Bacon, Pedro Oliva (1245/1249-1298), Duns Scoto y otros autores del siglo XIII siguieron al Aquinate en defender a Avempace. En el siglo XV su «ley» fue universalmente rechazada por el influjo de Averroes y Bradwardino, pero encontró un defensor hacia finales del siglo en un cierto Magister Claius. Este defendía que los cuerpos pesados caerían en el vacío más aprisa que los ligeros, pero que ninguno de ellos alcanzaría una velocidad infinita. Galileo iba a utilizar» en sus primeros trabajos sobre Dinámica en Pisa, una expresión del movimiento idéntica a la de Avempace.

Junto con el análisis cuantitativo del movimiento de Avempace, en el siglo XIII hubo nuevos intentos de explicar la causa de la aceleración de los cuerpos que caen libremente y de la velocidad continuada de los proyectiles. Evidentemente, el medio no podía prestar ninguna ayuda si esos cuerpos se suponían *in vacuo*. Es un punto discutido si el mismo Aquinate aceptó la teoría de que el agente imprimía en el proyectil alguna clase de fuerza, alguna *virtus impressa*, que actuaba como un *instrumento* de su movimiento continuado. Ciertamente, él estudió esta teoría, pero también distinguió claramente entre las fuerzas motrices naturales, como la del poder intrínseco de crecimiento dado por el padre a la semilla en la reproducción, y la fuerza extrínseca no natural que mueve un

proyector. Parece que, de hecho, atribuyó esta última al medio. Oliva propuso una explicación del movimiento del proyectil por medio de lo que él llamó, en sus *Quaestiones in secundum librum Sententiarum*, «impulsos violentos o inclinaciones dados por el proyectil», comparables con los impulsos naturales de la pesadez y la ligereza. El contexto de la explicación de Oliva era el problema de la acción a distancia en una discusión de la causalidad en general. Citó el movimiento del proyectil como un ejemplo de la acción no causada por contacto directo, ni por el medio, sino por «especies» o «semejanzas» o «impresiones» inculcadas por el agente de la proyección sobre el proyectil y que lo movían después de que se había separado del proyectil. La explicación de Oliva, de hecho, era una adaptación de la teoría de la «multiplicación de las especies» de Grossetesta y Roger Bacon (cf. vol. I, pp. 75, 96-97, *supra* pp. 47 y ss.). Era básicamente una emanación neoplatónica, y le era esencial el que fuera movida hacia un fin.

El primer filósofo escolástico de la naturaleza que propuso una teoría de la «fuerza impresa» como una fuerza motriz aristotélica, una *vis motrix* determinada no por la meta, sino por el agente motor, parece haber sido un discípulo italiano de Duns Scoto, Francisco de Marchia. Marchia, en su comentario a las *Sentencias*, escrito alrededor de 1320, en París, siguió al Aquinate al discutir el problema de la causalidad instrumental. El contexto del problema, trasladado fácilmente por analogía de la Teología a la Física, es característico de gran parte de la filosofía escolástica de la naturaleza. Marchia, al investigar si el poder de producir la gracia

residía en los mismos sacramentos o provenía sólo directamente de Dios, planteaba el problema del movimiento de los proyectiles con el fin de mostrar que, en los sacramentos y en los proyectiles, había una cierta fuerza residual que era capaz de producir efectos. Rechazando la teoría de Aristóteles de que el movimiento de los proyectiles era provocado por el aire, concluyó que debía ser explicado, como dice la traducción del fragmento citado por la doctora Maier en su *Zwei Grundprobleme der Scholastischen Naturphilosophie* (p. 174), «por el movimiento o impulso de una fuerza dejada atrás (*virtus derelicta*) en la piedra por el motor primario», esto es, por la mano o por la cuerda del arco. Marchia tuvo cuidado de señalar que esta fuerza no era innata o permanente. Era una cualidad accidental, que era extrínseca y violenta, y al ser opuesta a las inclinaciones naturales del cuerpo era tolerada solamente durante un tiempo. Decía que la fuerza motriz de un proyectil era una «forma» que no era enteramente permanente, como la blancura o el calor del fuego, ni enteramente transitoria (*fluens, successiva*), como el proceso del calentamiento o del movimiento, sino algo intermedio que duraba un tiempo limitado.

La existencia en los escritos de Filopón y Avempace, y en los escolásticos de los siglos XIII y XIV, de una «ley del movimiento» semejante y de una concepción análoga de la fuerza motriz, ha llevado a los historiadores a buscar una posible conexión histórica entre ellos. Es verdad que casi todos estos autores pertenecen a la tradición neoplatónica, pero, sin embargo, no se ha hallado hasta la

fecha ninguna derivación documental. Hasta donde se sabe históricamente, las obras del mismo Filopón no fueron conocidas en la Edad Media. El conocimiento directo de sus opiniones parece haber estado limitado en gran parte, en la Edad Media, a la presentación incompleta y no muy clara de su postura por Simplicio, cuyo comentario a la *Física* fue traducido al latín en el siglo XIII. El estudio de Avicena sobre el movimiento de los proyectiles y la «fuerza impresa» no aparece en la parte de su comentario que fue traducido al latín con el título de *Sufficientia Physicorum*, el cual contiene solamente los cuatro primeros libros (cf. vol. I, cuadro I). Se sabe que Alpetragio estaba fuertemente influido por un discípulo de Avempace, Ibn Tofail, y la traducción latina de la obra de Alpetragio, realizada en 1528 y editada en Venecia en 1531 como *Theorica Planetarum*, daba una clara exposición de la teoría de Filopón, aunque no daba su nombre. Sin embargo, en la traducción medieval, realizada por Miguel Scot en 1217, con el título de *Liber Astronomiae*, la teoría es resumida hasta casi no quedar nada en el pasaje correspondiente. Hasta donde llegan las pruebas, la doctora Maier ha concluido que la teoría de la *fuerza impresa* y la del *impetus*, que le sucedió en el siglo XIV, fueron desarrolladas independientemente por los escolásticos, principalmente en su estudio de la causalidad instrumental en la reproducción y en los sacramentos.

No todos los filósofos de la naturaleza de los siglos XIII y XIV aceptaron esta opinión de la causa del movimiento de los proyectiles, y hubo muchos, por ejemplo, Gil de Roma, Ricardo de

Middleton, Walter Burley y Juan de Jandun, que continuaron aceptando la explicación de Aristóteles, aunque no era satisfactoria, porque estaban todavía menos satisfechos con las otras alternativas.

Pusieron objeciones a la acción a distancia mediatizada por la «multiplicación de las especies» y a la «fuerza impresa» como siendo igualmente imposibles. El autor del *De Ratione Ponderis*, de la escuela de Jordano Nemorarius (*vide* vol. I, pp. 111-112), afirmaba que el aire provocaba tanto la velocidad continua como la supuesta aceleración inicial de los proyectiles; en el siglo XVI, esta teoría era todavía aceptada parcialmente incluso por físicos como Leonardo da Vinci, Cardano y Tartaglia.

Para explicar la aceleración de los cuerpos que caen libremente, muchos filósofos de la naturaleza continuaron siguiendo a Aristóteles o a la teoría que recurría al aire o a la *antiperistasis*. Roger Bacon propuso una explicación original de los cuerpos que caen. Supuso que cada partícula en cada cuerpo pesado tendía naturalmente a caer por la trayectoria más corta hacia el centro del universo, pero que cada una tendía a ser desplazada de su trayectoria rectilínea por las partículas laterales a ella. La interferencia recíproca resultante de las diferentes partículas actuaba como una resistencia interna, que hacían que el movimiento necesitara tiempo aun en el vacío, y de este modo no era válido el argumento de Aristóteles de que ese movimiento sería instantáneo.

Respecto de la naturaleza de la «forma» que era la causa física del

movimiento, esto es, la naturaleza de la fuerza motriz que todas estas teorías presuponían como necesaria para el estado de ser en movimiento, se enfrentaron fuertemente, al menos, dos opiniones en el siglo XIV. La primera opinión era la asociada habitualmente con Duns Scoto, a saber, la teoría de que el movimiento era una «forma fluyente» o *forma fluens*. Según esta teoría, el movimiento era un flujo incesante en el que era imposible dividir o aislar un estado, y un cuerpo en movimiento era determinado sucesivamente por una forma distinta a la vez del mismo cuerpo en movimiento y del lugar o espacio por el que pasaba. Esta teoría fue defendida por Juan Buridán y Alberto de Sajonia. La segunda opinión era que el movimiento era una serie continua de estados distinguibles. Una forma de esta teoría fue defendida por Gregorio de Rimini, quien identificó el movimiento con el espacio adquirido durante el movimiento, y dijo que durante el movimiento, el cuerpo que se movía adquiría de instante a instante una serie de diferentes atributos de lugar.

Una tercera concepción del movimiento, que partía de un punto de vista radicalmente distinto, fue la propuesta por Ockham. Uno de los principales objetos de las investigaciones lógicas de Ockham era el definir los criterios por los que se podía decir que una cosa existía (cf. *supra* pp. 52-62). Afirmaba que no existía nada realmente, excepto lo que él llamaba *res absolutae* o *res permanentes*, cosas individuales, sustancias determinadas por cualidades observables. En la *Summa Totius Logicae*, parte 1, capítulo 49, decía: «Aparte de las *res absolutae*, esto es, sustancias y cualidades, no es imaginable ninguna cosa ni en acto ni en potencia.» Términos como «tiempo» y

«movimiento» no designaban *res absolutae*, sino relaciones entre *res absolutae*. Designaban lo que Ockham llamaba *res respectivae*, sin existencia real. Es este cuidadoso análisis de las significaciones de los términos lo que es un rasgo tan notable de la obra de Ockham, y fue gracias a ello como él y otros «terministas» hicieron tanto para clarificar muchas cuestiones en la filosofía del siglo XIV. Como decía en sus *Summulae in Libros Physicorum*, libro 3, capítulo 7: «Si buscamos la precisión utilizando palabras como 'motor', 'movido', 'movible', 'ser movido' y otras semejantes, en vez de palabras como 'movimiento', 'movilidad' y otras de la misma especie, que según la forma del lenguaje y la opinión de muchos no parecen significar cosas permanentes, se evitarían muchas dificultades y dudas. Pero ahora, debido a ellas, parece como si el movimiento fuera algo o alguna cosa independiente o completamente distinta de las cosas permanentes.»

Aplicando esta distinción al problema de la Dinámica, Ockham rechazó por completo el principio básico de Aristóteles de que el movimiento local fuera una potencialidad actualizada. Definió el movimiento como la existencia sucesiva, sin reposo intermedio, de una identidad continua que existía en lugares diferentes; y para él, el mismo movimiento era un concepto que no tenía realidad, aparte de los cuerpos en movimiento que podían ser percibidos. Era innecesario postular cualquier forma inherente que causara el movimiento, cualquier entidad real distinta del cuerpo en movimiento, cualquier flujo o curso. Todo lo que era necesario decir era que de instante a instante el cuerpo en movimiento tenía una relación

espacial diferente con otro cuerpo. Cada efecto nuevo requería una causa; pero el movimiento no era un efecto nuevo, porque no era nada, sino que el cuerpo existía sucesivamente en lugares distintos. Ockham rechazó, por tanto, las tres explicaciones corrientes de la causa del movimiento de los proyectiles, el impulso del aire, la acción a distancia mediante las «especies» y la «fuerza impresa» mediante las «especies» y la «fuerza impresa» dada al mismo proyectil (cf. *supra* p. 47). «Digo, por tanto —decía en su *Comentario a las sentencias*, libro 2, cuestión 26, M—,

que lo que mueve (ipsum movens) en el movimiento de esta clase, después de la separación del cuerpo en movimiento del projector original, es el cuerpo movido por sí mismo (ipsum motum secundum se) y no por alguna fuerza en él o relativa a él (virtus absoluta in eo vel respectiva), porque es imposible distinguir entre lo que hace el motor y lo que es movido (movens et motum est penitus indisunctum). Si dices que un nuevo efecto tiene una causa y que el movimiento local es un nuevo efecto, yo afirmo que el movimiento local no es un nuevo efecto en el sentido de un efecto real... porque no es otra cosa sino el hecho de que el cuerpo en movimiento está en diferentes partes del espacio, de tal manera que no está en ninguna parte, puesto que dos contradictorias no pueden ser ambas verdad... Aunque una parte determinada del espacio que es atravesada por el cuerpo en movimiento es nueva respecto al cuerpo en movimiento, al ver que el cuerpo se mueve ahora a través de esas partes y antes no lo había, sin embargo, esa parte no es nueva, realmente hablando... Sería asombroso, ciertamente,

*si mi mano produjera alguna fuerza en la piedra por el mero hecho de que por medio del movimiento local se puso en contacto con la piedra.*¹⁰

Amplió esta concepción con una aplicación del principio de economía en el llamado *Tractatus de Successivis*, editado por Boehner, afirmando en la parte I (p. 45):

El movimiento no es una cosa enteramente distinta en sí misma del cuerpo permanente, porque es superfluo utilizar más entidades cuando es posible utilizar menos... Que podemos salvar el movimiento sin esa cosa adicional, y todo lo que es afirmado sobre

el movimiento, aparece claro al considerar las partes diferentes del movimiento. Porque es claro que el movimiento local ha de ser concebido de la manera siguiente: suponiendo que el cuerpo está en un lugar y luego en otro lugar, procediendo, pues, sin ningún reposo o alguna cosa intermediaria distinta del mismo cuerpo y del mismo agente que lo mueve, tenemos realmente un movimiento local. Por tanto, es superfluo postular esas otras cosas.

Lo mismo, decía, se aplicaba al cambio de cualidad y al crecimiento y al decrecimiento (cf. vol. I, pp. 65-66). En la parte 3 (pp. 121-122) continuaba:

Es claro cómo deben ser atribuidos «ahora antes» y «ahora después», tratando «ahora» primero: esta parte del cuerpo en movimiento está ahora en esta posición, y luego es verdadero decir que ahora está en otra posición, y así sucesivamente. Y así

aparece claro que «ahora» no significa algo distinto, sino que siempre significa el mismo cuerpo en movimiento que permanece el mismo en sí mismo, de manera que ni adquiere nada nuevo ni pierde algo que existía en él. Pero el cuerpo en movimiento no permanece siempre al mismo respecto de su entorno, y así es posible atribuir «antes» y «después», esto es, decir; «Este cuerpo está ahora en A y no en B», y luego será verdadero decir: «Este cuerpo está ahora en B y no en A», de modo que las contradictorias se hacen verdaderas sucesivamente.

Algunos historiadores han pretendido que, al rechazar el principio básico aristotélico expresado por la frase *Omne quod movetur ab alto movetur*, Ockham dio el primer paso hacia el principio de inercia¹¹, que iba a revolucionar la Física en el siglo XVII. Es cierto que, al afirmar la posibilidad del movimiento bajo la acción de ninguna fuerza motriz, una posibilidad excluida formalmente por el principio aristotélico, Ockham abría la puerta al principio de inercia y a la definición del siglo XVIII de la fuerza como lo que altera el estado de reposo o de la velocidad uniforme; con otras palabras, lo que produce la aceleración. La importancia de la concepción de Ockham para las ideas sobre el movimiento del siglo XVII se hace todavía más sugestiva cuando se considera en unión de las ideas de algunos otros autores del siglo XIV. Nicolás de Autrecourt, por ejemplo, las relacionó con su concepción de la naturaleza atómica del continuo y del tiempo. Marsilio de Inghen, aunque rechazara la concepción de Ockham sobre el movimiento, la estudió en conexión

con la concepción del espacio infinito, una idea que está estrechamente relacionada con la «geometrización del espacio» en el siglo XVII. Nicolás de Oresme (muerto en 1382), aunque conservó la *forma fluens* para explicar el movimiento, propuso que la idea del movimiento absoluto podía ser definida solamente por referencia a un espacio infinito inmóvil, situado más allá de las estrellas fijas e identificado con la infinitud de Dios. Newton no parece muy lejano de estos pasajes como físico y como teólogo natural.

Pero la relación lógica e histórica de la concepción de Ockham sobre el movimiento al principio de inercia no es por ningún concepto enteramente rectilínea. Si estamos tentados de leer sus afirmaciones a la luz de la afirmación similar de Descartes, que no hizo ninguna distinción entre el movimiento y el cuerpo que se mueve, debemos recordar también que, tanto para Descartes como para Newton, el cambio en las relaciones espaciales al pasar de un estado de reposo a un estado de movimiento *era un nuevo efecto*. Era un efecto que exigía para su producción no solamente una causa, sino una causa exactamente determinada. De la concepción de movimiento de Ockham no es posible, en efecto, deducir algunas de las propiedades esenciales de la conservación de la velocidad y la dirección implicadas por el principio moderno de la inercia. Sin embargo, Ockham no había pasado por alto los aspectos dinámicos del movimiento. En su *Expositio super Libros Physicorum*, al estudiar la controversia entre los defensores de Averroes y de Avempace, defendió al Aquinate, que decía que donde no hay resistencia, el movimiento necesita tiempo, dependiendo la cantidad

de tiempo de la distancia. Pero donde había una resistencia material, decía que el tiempo dependería de la proporción de la fuerza motriz a la resistencia. De este modo distinguió lo que ahora llamamos la medida cinemática de la velocidad de la medida dinámica de la fuerza motriz, o fuerza, en términos del trabajo realizado. La confusión de estas medidas es otro ejemplo de la dificultad con la que (en nuestra opinión) fueron aprehendidos los conceptos mecánicos aparentemente más elementales, una dificultad que incluso todo el siglo XVII no llegó a dominar enteramente. Cuando Bradwardino rechazaba la «ley del movimiento» de Avempace, utilizaba argumentos similares a los de Ockham, y es difícil no ver una conexión en el giro del problema del «porqué» al «cómo» que ambos realizaron, Ockham como lógico y Bradwardino como físico matemático. En todo caso, no fue Ockham quien produjo la teoría dinámica más significativa e influyente del siglo XIV, sino un físico cuya concepción era completamente opuesta a la de los «terministas», Juan Buridán, que fue dos veces rector de la Universidad de París entre 1328 y 1340. Buridán estudió los problemas clásicos del movimiento en sus *Quaestiones super Ocio Libros Physicorum* y en sus *Quaestiones de Caelo et Mundo*. A las críticas corrientes de las teorías del movimiento de los proyectiles platónica y aristotélica añadió la de que el aire no podía explicar el movimiento rotatorio de una piedra de molino o de un disco, porque el movimiento continuaba aun cuando se colocara una cubierta sobre los cuerpos, cortando así el aire. Igualmente rechazó la explicación de la aceleración de los cuerpos que caen

libremente por la atracción del lugar natural, porque defendía que el motor debe acompañar al cuerpo movido (cf. *supra* pp. 48 y ss.). La teoría del *Impetus*, por medio de la cual explicaba los diferentes fenómenos del movimiento constante y acelerado, se basaba, como la teoría anterior de la *virtus impressa*, sobre los principios de Aristóteles de que todo movimiento requiere un motor y de que la causa debe ser proporcionada al efecto. En este sentido, la teoría del *impetus* era la conclusión histórica de una línea de desarrollo dentro de la física aristotélica, más que el comienzo de una nueva dinámica de la inercia, de la cual, ya que estaba todavía en el futuro, Buridán no conoció, por supuesto, nada. Pero, influido por Bradwardino, Buridán formuló su teoría con mayor exactitud cuantitativa que cualquiera de sus predecesores. Es este aspecto de algunas de sus definiciones esenciales el que mira hacia el futuro.

Puesto que las explicaciones de la persistencia del movimiento de un cuerpo después de haber abandonado al motor original fracasaron, Buridán concluyó que el motor debe imprimir al mismo cuerpo un cierto *impetus*, una fuerza motriz gracias a la cual continuaba moviéndose hasta que era afectada por la acción de fuerzas independientes. En los proyectiles, este *impetus* se reducía progresivamente por la resistencia del aire y por la gravedad natural a caer hacia abajo; en los cuerpos que caían libremente, aumentaba gradualmente por la gravedad natural, que actuaba como una fuerza aceleradora que añadía incrementos o *impetus* sucesivos, o «gravedad accidental», a los ya adquiridos. La medida del *impetus* de un cuerpo era su cantidad de materia multiplicada por su velocidad.

«Por tanto, creo —escribía Buridán en sus *Quaestiones super Ocio Libros Physicorum*, libro 8, cuestión 12¹²:

que debemos concluir que un motor, al mover un cuerpo, imprime en él un cierto impetus, una cierta fuerza capaz de mover este cuerpo en la dirección en la que lo lanzó el motor, sea hacia arriba o hacia abajo, hacia un lado o en círculo. Cuanto más rápidamente el motor mueve al mismo cuerpo, tanto más poderoso es el impetus impreso en él. Es por este Impetus por lo que la piedra es movida después de que el lanzador deja de moverla; pero, a causa de la resistencia del aire y también a causa de la gravedad de la piedra, que la inclina a moverse en una dirección opuesta a la que el Impetus tiende a moverla, este impetus se debilita continuamente. Por tanto, el movimiento de la piedra se hará continuamente más lento, y a la larga el Impetus está tan disminuido o destruido que la gravedad de la piedra prevalece sobre él y mueve la piedra hacia abajo, hacia su lugar natural.

Creo que se puede aceptar esta explicación porque las otras explicaciones no parecen ser verdaderas, mientras que todos los fenómenos están de acuerdo con ésta.

Porque si se pregunta por qué puedo lanzar una piedra más lejos que una pluma y un trozo de hierro o de plomo apropiado a la mano más lejos que un trozo de madera del mismo tamaño, afirmo que la causa de esto es que la recepción de todas las formas y disposiciones está en la materia y por razón de la materia. Por tanto, cuanta más materia contiene un cuerpo, más

impetus puede recibir y es mayor la intensidad con que puede recibirlo. Ahora bien, en un cuerpo pesado, denso, hay, siendo iguales las otras cosas, más materia prima que en un cuerpo ligero, raro u. Por tanto, un cuerpo pesado, denso, recibe más impetus y lo recibe con más intensidad [que un cuerpo ligero, raro]. De la misma forma, una cierta cantidad de hierro puede recibir más calor que una cantidad igual de agua o de madera. Una pluma recibe un impetus tan débil que es destruido rápidamente por la resistencia del aire, y, de manera similar, si uno lanza con igual velocidad un trozo de madera y un trozo pesado de hierro del mismo tamaño y forma, el trozo de hierro irá más lejos porque el impetus impreso en él es de mayor intensidad, y éste no decae con la misma rapidez que el Impetus más débil. Por la misma razón, es más difícil detener una rueda de molino grande, que se mueve rápidamente, que una pequeña; siendo iguales todas las otras cosas, en la rueda grande hay más impetus que en la pequeña. En virtud de la misma razón, puedes lanzar una piedra de una libra o de media libra más lejos que la milésima parte de esa piedra: en la milésima parte, el impetus es tan pequeño que es pronto vencido por la resistencia del aire.

Esta me parece también ser la causa que explica por qué la caída natural de los cuerpos pesados se acelera continuamente. Al principio de esta caída, la gravedad sola movía al cuerpo: caía entonces más lentamente; pero, al moverse, esta gravedad imprimía en el cuerpo un impetus, el cual impetus mueve el

cuerpo al mismo tiempo que la gravedad. El movimiento se hace, por tanto, más rápido, y en la medida en que se hace más rápido, en esa misma medida se hace el impetus más intenso. Es evidente así que el movimiento irá acelerándose continuamente.

Quien quiere saltar lejos va hacia atrás un largo trecho para poder correr más aprisa y adquirir así un impetus que, durante el salto, lo lleva una larga distancia. Más aún, mientras corre y salta no siente que el aire le mueve, sino que siente que el aire frente a él le resiste con fuerza.

Uno no encuentra en la Biblia que haya Inteligencias encargadas de comunicar a las esferas celestes sus movimientos adecuados; está permitido, pues, demostrar que no es necesario suponer la existencia de esas Inteligencias. Se puede decir, de hecho, que Dios, cuando creó el universo, puso en movimiento las esferas como le plugo, imprimiendo a cada una de ellas un Impetus que la ha movido desde siempre. Dios no tiene, por tanto, que mover más a estas esferas, excepto ejerciendo un influjo general parecido a ese por el que da su cooperación a todos los fenómenos. Así pudo descansar el séptimo día del trabajo que había realizado, confiando a las cosas creadas sus causas y efectos recíprocos. Estos Impetus que Dios imprimió en los cuerpos celestes no han sido reducidos o destruidos por el paso del tiempo, porque no había en los cuerpos celestes ninguna inclinación hacia otros movimientos y no había resistencia que pudiera corromper o retener estos

impetus. No doy todo esto por cierto; solamente preguntaría a los teólogos cómo podrían producirse todas estas cosas¹³...

Continuaba definiendo la relación de esta teoría del *impetus* con las otras teorías del movimiento de su época. Primero insistía en que mientras el *impetus* de un proyectil era un principio intrínseco del movimiento que era inherente al cuerpo que movía, era un principio violento y no natural impreso en el cuerpo por un agente externo y era opuesto a la gravedad natural del cuerpo. Pero ¿qué era el *impetus*? No podía ser identificado con el mismo movimiento, argumentaba, evidentemente refiriéndose a Ockham, porque el propósito de la teoría era proponer una causa del movimiento. Así que era algo distinto del cuerpo en movimiento. Ni podía ser algo puramente transitorio, como el mismo movimiento, porque esto exigía un agente continuo para producirlo. Concluía, pues:

Este impetus es una cosa duradera (res naturae permanentis), distinta del movimiento local, por la cual el proyectil es movido... Y es probable que este impetus sea una cualidad asignada por la naturaleza para mover el cuerpo sobre el cual es impreso, de la misma manera que se dice que una cualidad impresa por un imán sobre un pedazo de hierro mueve el hierro hacia el imán. Y es probable que de la misma forma que esta cualidad es impresa por el motor en el cuerpo en movimiento juntamente con el movimiento, también sea disminuido, corrompido y obstruido, como lo es el movimiento, por la resistencia [del medio] o la tendencia [natural] contraria.

Se ha pretendido que al hacer del *impetus* una *res permanens*, una fuerza motriz duradera que mantiene al cuerpo en movimiento sin cambio en la medida en que no era afectado por fuerzas que lo disminuían o lo aumentaban, Buridán dio un paso estratégico hacia el principio de inercia. Es verdad que su *impetus* era, desde este punto de vista, un progreso sobre la *virtus* de Marchia, la cual duraba solamente *ad modicum tempus*. Es verdad también que existen semejanzas notables entre algunas de las definiciones fundamentales de Buridán y las de la dinámica del siglo XVII. La medida que propone Buridán del *impetus* de un cuerpo como proporcional a la cantidad de materia y a la velocidad sugiere la definición de Galileo del *impeto* o *momento*, la *quantité de mouvement* de Descartes, e incluso el *momento* de Newton como el producto de la masa multiplicada por la velocidad. Es verdad que el *impetus* de Buridán, en ausencia de fuerzas independientes, podía continuar en círculo en los cuerpos celestes y en línea recta en los cuerpos terrestres, mientras que el *momento* de Newton permanecería solamente en línea recta en todos los cuerpos y necesitaría una fuerza para ser llevado a una trayectoria circular. Galileo en esto no estaba con Newton, sino en una posición intermedia entre él y Buridán.

También existe una cierta semejanza entre el *impetus* de Buridán y la *forcé vive*, o energía cinética, de Leibniz. Buridán, al explicar la aceleración de los cuerpos que caen libremente, decía en sus *Quaestiones de Caelo et Mundo*, libro 2, cuestión 12:

Debe pensarse que un cuerpo pesado no adquiere movimiento solamente de su motor primario, a saber, de su gravedad, sino que también adquiere en él mismo un cierto Impetus junto con ese movimiento, que tiene el poder de mover el mismo cuerpo, junto con la gravedad natural constante. Y porque este impetus es adquirido proporcionalmente al movimiento; por tanto, cuanto más rápido sea el movimiento, tanto mayor y fuerte será el Impetus. Así, en consecuencia, el cuerpo pesado es movido inicialmente sólo por su gravedad natural, y por tanto lentamente, pero luego es movido por la misma gravedad natural y simultáneamente por el impetus que ha sido adquirido, y de ese modo se mueve más rápidamente; ...y de nuevo es así movido más rápidamente, y así es siempre continuamente acelerado, hasta el fin.

Algunos, concluía, llaman a este *impetus* «gravedad accidental».

Es interesante buscar analogías entre los términos que aparecen en sistemas de dinámica tan distantes en el tiempo, pero éstas pueden también ocultarnos el hiato que puede separar sus contenidos. ¿Se puede afirmar realmente que la formulación de la teoría del *impetus* de Buridán implicaba la definición de fuerza del siglo XVII como lo que no mantenía meramente la velocidad, sino que la modificaba? Todo lo que Buridán escribió sobre el *impetus* indica que lo proponía como una causa aristotélica del movimiento que debía ser proporcionada al efecto; por tanto, si la velocidad aumentaba, como en los cuerpos que caen, también debía hacerlo el *impetus*. Es

verdad que se puede considerar el *impetus* de Buridán, como un resultado de su intento de formulaciones cuantitativas, como algo más que una causa aristotélica, como una fuerza o poder poseído por un cuerpo, en razón de estar en movimiento, de alterar el estado de reposo o movimiento de otros cuerpos en su trayectoria. Es verdad también que existen demasiadas semejanzas entre esto y la definición de *impeto* o *momento* dada por Galileo en su *Dos nuevas ciencias* para que se suponga que éste no debía nada a Buridán (cf. *infra* pp. 139 y ss.), Pero considerándolo en su propia época, y no como un precursor de algo futuro, es evidente que el mismo Buridán consideró su teoría como una solución a los problemas clásicos que surgían dentro del contexto de la dinámica aristotélica, de la que él nunca se evadió. Esto es ilustrado por la cuestión más sugestiva de sus *Quaestiones in Libros Metaphysicae*, la cuestión 9 del libro 12;

Muchos suponen que el proyectil, después de abandonar el proyector, es movido por un impetus dado por el proyector, y que es movido mientras el impetus continua siendo más fuerte que la resistencia. El impetus duraría indefinidamente (in infinitum duraret impetus) si no fuera disminuido por un contrario resistente o por una inclinación a un movimiento contrario; y en el movimiento celeste no hay resistencia contraria, de manera que cuando en la creación del mundo, Dios movió una esfera con la velocidad que quiso, El dejó de mover, y ese movimiento duró después por siempre debido al impetus impreso en esa esfera. Por eso se dice que Dios descansó el séptimo día de todos los

trabajos que había realizado.

¿Significa esto que el *impetus* duraría de hecho siempre en todos los cuerpos en ausencia de fuerzas opuestas? Buridán lo afirma solamente de los cuerpos celestes, cuyo movimiento continuo era naturalmente circular. Pero en los cuerpos terrestres, el *impetus* impreso violentamente, por ejemplo, a un proyectil, encontraría siempre la oposición de la tendencia natural del cuerpo hacia su lugar natural, para reposar en él. Más aún, según la ley dinámica fundamental, que Buridán aceptó con la formulación de Bradwardino, de que la velocidad era proporcional a la fuerza y a la resistencia; si no hubiera resistencia, la velocidad sería infinita. Participando del empirismo común a todos los aristotélicos, Buridán no pensó en abstraer los efectos de sólo el *impetus* de los de su interacción con las tendencias naturales y con la resistencia. Permaneció próximo al mundo natural tal como lo veía. No concibió el principio de movimiento de inercia en el espacio vacío.

Pero en un sentido profundo, Buridán y sus contemporáneos anticiparon la gran reforma cosmológica de los siglos XVI y XVII. La teoría del *impetus* de Buridán fue un intento de incluir los movimientos celestes y los terrenos en un único sistema mecánico. En este intento fue seguido por Alberto de Sajonia, Marsilio de Inghen y Nicolás Oresme; aunque Oresme, defendiendo que en la región terrestre había solamente movimientos acelerados y retardados, adaptó la teoría del *impetus* a esta hipótesis y parece que no lo consideraba como una *res naturae permanentis*, sino como

algo que «duraba solamente algún tiempo». La teoría, bajo una forma u otra, fue aceptada ampliamente en los siglos XIV y XV en Francia, Inglaterra e Italia.

Respecto de la dinámica terrestre, Buridán explicó el rebote de una pelota por analogía con la reflexión de la luz, diciendo que el *impetus* inicial comprimía la pelota con violencia cuando ella golpeaba el suelo; y cuando rebotaba, esto le daba un nuevo *Impetus*, que hacía que la pelota saliera hacia arriba¹⁴. Dio una explicación similar de la vibración de una cuerda y de la oscilación de una campana balanceándose.

Alberto de Sajonia utilizó la teoría de Buridán para explicar la trayectoria de un proyectil por medio de *impetus* compuestos, una idea que se remontaba hasta el astrónomo griego del siglo n a. C. Hipparco, cuya exposición fue conservada en el comentario al *De Caelo* de Simplicio. Según los principios aristotélicos, un cuerpo elemental podía tener solamente un movimiento a la vez, porque una sustancia no podía tener dos atributos contradictorios al mismo tiempo. Si eso ocurriera uno destruiría al otro. Alberto de Sajonia defendió que la trayectoria de un proyectil estaba dividida en tres períodos:

1. un período inicial de movimiento puramente violento durante el cual el *impetus* imprimido aniquilaba la gravedad natural;
2. un período intermedio de *impetus* compuesto durante el cual el movimiento era a la vez violento y natural, y
3. un período final del movimiento puramente natural de caída hacia abajo vertical después que la gravedad natural y la

resistencia habían superado al *impetus impresso* (fig. 1).

Creía que la resistencia del aire tenía un valor de fricción definido aun cuando el proyectil estuviera en reposo. En un proyectil lanzado horizontalmente el movimiento durante el primer período era en línea recta horizontal hasta que ésta se curvaba bruscamente durante el segundo período para caer verticalmente en el tercero.

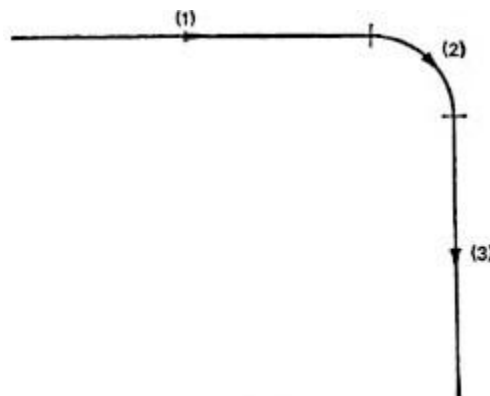


Fig. 1

Cuando se lanzaba el proyectil verticalmente hacia arriba éste llegaba a un estado de reposo en el segundo período (o *quies media*) y descendía cuando la gravedad natural sobrepasaba a la resistencia del aire. Esta teoría fue aceptada por Blas de Parma (muerto en 1416), Nicolás de Cusa, Leonardo da Vinci y otros seguidores de Alberto de Sajonia, hasta que fue modificada de acuerdo con los principios matemáticos de Tartaglia en el siglo XVI y sustituida finalmente por Galileo en el siglo XVII.

Los progresos más significativos de la nueva dinámica de la región celeste tuvieron lugar en la aplicación de la posibilidad de la

rotación de la Tierra sobre su eje (cf. vol. I, p. 88). Esta había sido estudiada y rechazada por dos astrónomos persas del siglo XIII, al-Katibi y al-Shirazi, aunque no se ha establecido ninguna relación entre ellos y los autores latinos del siglo XIV. Para éstos el problema implicaba no sólo la explicación dinámica de la persistencia del movimiento, sino también los conceptos de espacio y gravitación. Los autores más importantes en el estudio de la posibilidad del movimiento de la Tierra y en relacionarla con los problemas afines fueron Buridán y Oresme. La frecuencia de sus referencias a las condenaciones parisinas de 1277 es un ejemplo más de su importancia en las especulaciones científicas de los años siguientes (cf. *supra*, p. 39).

Buridán, en sus *Quaestiones de Caelo et Mundo*, mencionaba que muchos defendían que el movimiento diario de rotación de la Tierra era probable, aunque añadía que ellos proponían esta posibilidad como un ejercicio escolástico. Se dio cuenta de que la observación inmediata de los cuerpos no podía ayudar a decidir si eran los cielos los que se movían o lo era la Tierra, pero rechazó el movimiento de la Tierra basándose en observaciones. Por ejemplo, señaló que una flecha disparada verticalmente caía en el lugar desde el que había sido disparada. Si la Tierra girara, decía, eso sería imposible; y respecto a la sugerencia de que el aire que giraba arrastrara a la flecha decía que el *impetus* de la flecha resistiría la tracción lateral del aire.

El estudio de la rotación diaria de la Tierra realizado por Oresme fue más elaborado. Estudió el problema en su *Livre du ciel et du monde*,

un comentario en francés al *De Caelo* de Aristóteles escrito en 1377 por encargo de Carlos V de Francia, que también le encargó traducir del latín al francés la *Ética*, la *Política* y la *Economía* de Aristóteles¹⁵. Carlos, que era un amante de las letras y de su propia lengua, poseía un *cabinet de livres* en el Louvre, conteniendo un gran número de libros traducidos al romance por encargo suyo, y animó a los miembros de su corte para que los leyeran para su formación y goce. El análisis de Oresme de todo el problema fue el más detallado y agudo realizado en el período que va de los astrónomos griegos a Copérnico. En su forma de tratar la mezcolanza de cuestiones científicas, filosóficas y teológicas, implicadas, anticipó las obras polémicas de Galileo.

Al defender el sistema geostático, una cuestión importante estudiada por Oresme fue la del movimiento constante de las esferas. Puesto que su versión de la teoría del *impetus* no podía explicar el movimiento constante, retornó a una teoría vaga de equilibrio entre «las cualidades y fuerzas motrices» que Dios comunicó a las esferas en la creación para corresponder a la gravedad (*pesanteur*) de los cuerpos terrestres y la «resistencia» proporcionada que se oponía a estas fuerzas (*vertus*). De hecho, decía que en la creación estas fuerzas y resistencias habían sido conferidas por Dios a las «Inteligencias» que movían los cuerpos celestes; las Inteligencias se movían con los cuerpos a los que movían y estaban relacionadas con ellos de la misma forma que el alma lo estaba con el cuerpo. En el libro 2, capítulo 2 de *Le livre du ciel*, comparaba la máquina a un reloj y concluía:

Y estas fuerzas están controladas, templadas y armonizadas de tal manera con las resistencias que los movimientos se hacen sin violencia; y aparte de la violencia, no es de ninguna manera como un hombre que construye un reloj y lo deja andar y moverse por sí mismo. Así, Dios dejó que los cielos se movieran continuamente según las proporciones que sus fuerzas motrices tenían a sus resistencias y con el orden establecido.

¿Era, sin embargo, posible aceptar las hipótesis sobre las que se basaba el sistema geostático y las objeciones tradicionales al movimiento de la Tierra? Una de las hipótesis fundamentales de la cosmología de Aristóteles era el que debía haber en el centro del universo un cuerpo fijo alrededor del cual giraban las esferas celestes y en relación al cual se realizaban los movimientos terrestres. Oresme argumentaba contra esto que las direcciones del espacio, el movimiento y la gravedad natural y la levitación debían, en la medida en que eran observables, ser consideradas todas ellas relativas.

Oresme estaba de acuerdo con los que argüían que Dios por su potencia infinita podía crear un espacio infinito y tantos mundos como quisiera. «Y así —escribía en el libro 1, capítulo 24 de *Le livre du ciel*—, más allá del firmamento hay un espacio vacío, incorpóreo, completamente distinto del espacio ordinariamente lleno y corpóreo, de la misma forma que la duración conocida como eternidad es completamente distinta de la duración temporal, incluso aunque ésta fuera perpetua... Además, este espacio mencionado antes es

infinito e indivisible y es la inmensidad de Dios e incluso es Dios, igual que la duración de Dios conocida como eternidad es infinita e indivisible e incluso Dios...»

Oresme demostró que, en la medida en que se distinguían direcciones en nuestro universo, al considerar derecha e izquierda, delante y detrás, «estas cuatro diferencias no son absoluta y realmente distintas en el firmamento, sino sólo relativamente, como se dice» (libro 2, capítulo 6). Solamente se podía decir que arriba y abajo eran absoluta y realmente distintos, pero únicamente respecto de un universo determinado. Podíamos, por ejemplo, distinguir arriba y abajo de acuerdo con el movimiento de los cuerpos ligeros y pesados. «Afirmo entonces que arriba y abajo en esta forma no son otra cosa que el orden natural de los cuerpos ligeros y pesados, que es de tal manera que todas las cosas pesadas, en cuanto es posible, están en el medio de las cosas ligeras, sin determinar ningún otro lugar inmóvil para ellas» (libro 1, capítulo 24). Oresme, combinando esta teoría pitagórica o platónica de la gravedad con la concepción del espacio infinito, podía así prescindir de un centro del universo fijo al que estuvieran referidos todos los movimientos naturales de la gravitación. La gravedad era sencillamente la propiedad de los cuerpos más pesados de dirigirse al centro de las masas esféricas de materia. La gravedad producía movimientos únicamente en relación a un universo determinado; no había una dirección absoluta de la gravedad que se aplicara a todo estado.

No había fundamento, por tanto, para argüir que, suponiendo que los cielos giraran, la Tierra debía estar necesariamente *fija en el*

centro. Oresme demostró, basándose en la *analogía de una rueda* que gira, que era solamente necesario en el movimiento circular el que un punto matemático imaginario estuviera en reposo en el centro, como era supuesto, en efecto, en la teoría de los epiciclos. Además, decía que no era parte de la definición del movimiento local el que estuviera referido a algún punto fijo o a algún cuerpo fijo. Por ejemplo, «más allá del universo hay un espacio concebido como infinito e inmóvil, y es posible, sin que esto contradiga al universo, el moverse en este espacio en línea recta. Y decir lo contrario es un artículo condenado en París. El cual postulaba que no hay ningún otro cuerpo al que esté referido el universo de ninguna otra manera según el lugar... Además, imaginando que la Tierra se moviera a través de este espacio durante un día de movimiento diario y que los cielos estuvieran en reposo, y después de este tiempo las cosas estuvieran de nuevo como estaban» (libro 2, capítulo 8): entonces todo sería de nuevo como era antes.

En el capítulo 25 del libro 2 de *Le livre du ciel*, Oresme decía que le parecía que era posible defender la opinión, «siempre sujeta a corrección», de que la Tierra se mueve con movimiento diario y los cielos no. Y primero diré que es imposible demostrar lo contrario por ninguna observación (*expérience*); segundo, por la razón (*par raisons*), y tercero, aportaré razones en favor de la opinión». Las objeciones que Oresme citó en contra del movimiento de la Tierra habían sido todas ellas mencionadas por Ptolomeo e iban a ser utilizadas contra Copérnico; les hizo frente con argumentos que a su vez iban a ser utilizados por Copérnico y por Bruno.

La primera objeción a partir de la experiencia era que se observaba efectivamente que los cielos giraban alrededor de su eje polar. Oresme replicaba a esto citando el cuarto libro de la *Perspectiva* de Witelo, que el único movimiento observable era el movimiento relativo.

Supongo que el movimiento local no puede ser observado, excepto en la medida en que es visto cambiar de posición respecto de otro cuerpo. Así, si un hombre está en una barca A, que se mueve muy suavemente, ni aprisa ni lentamente, y no puede ver otra cosa, excepto otra barca B, que se mueve exactamente de la misma forma que la barca A en la que él está, digo que a ese hombre le parecerá que ninguna de las dos barcas está en movimiento. Si A está detenida y B se mueve, le parecerá que B se mueve; y si A se mueve y B está detenida, le parecerá igualmente como antes, que B se mueve. Y de la misma forma si A estuviera detenida durante una hora y B estuviera en movimiento, y luego durante la hora siguiente, e converso, A se moviera y B estuviera quieta, ese hombre no sería capaz de percibir este cambio o variación, sino que todo el tiempo le parecería que B se estaba moviendo; y ésta es la evidencia de la experiencia... Nos parecería todo el tiempo que el lugar en que nos encontramos está en reposo y que los otros se mueven siempre, de la misma forma que a un hombre que se mueve en una barca le parece que los árboles se están moviendo. De manera semejante, si un hombre estuviera en el firmamento, suponiendo que él se moviera con un movimiento

diario... le parecería que la Tierra se movía con movimiento diario, precisamente de la misma forma que nos parece a nosotros desde la Tierra que el cielo se mueve. De manera semejante, si la Tierra estuviera en movimiento diario y el cielo no, nos parecería que la Tierra estaba en reposo y que el cielo se movía. Cualquier persona inteligente puede imaginar fácilmente esto.

La segunda objeción a partir de la experiencia era que si la Tierra giraba por el aire de Oeste a Este habría un soplo de viento fuerte continuado de Este a Oeste. Oresme replicó a esto que el aire y el agua participaban de la rotación de la Tierra, de forma que no habría tal viento. La tercera objeción era la que concibió Buridán: que si la Tierra giraba, una flecha o una piedra disparadas verticalmente hacia arriba deberían quedar atrás hacia el Oeste cuando cayeran, mientras que de hecho caían en el lugar de donde habían sido lanzadas. La respuesta de Oresme a esta objeción era muy significativa. Decía que la flecha «se mueve muy rápidamente hacia el Este con el aire que atraviesa y con la masa entera de la parte inferior del universo indicada antes que se mueve con movimiento diario, y de ese modo la flecha vuelve al lugar en la Tierra desde donde fue lanzada». De hecho, la flecha tendría dos movimientos y no uno sólo, un movimiento vertical a partir del arco, y un movimiento circular por estar en el globo en rotación. La trayectoria efectiva de la flecha, decía, sería comparable a la de una partícula de fuego (*a*) que se elevara de una posición a una más alta

cerca de las esferas celestes. Ilustraba esto con un diagrama que mostraba que la partícula de fuego no se elevaba meramente a una posición *b* por encima de *a* directamente, sino que cuando se elevaba sería llevada lateralmente por el movimiento circular a una posición *c* a un lado de *b*.

*Afirmo que, como en el caso de la flecha tratado antes, se puede decir también en este caso que el movimiento de *a* está compuesto parcialmente de un movimiento rectilíneo y parcialmente de un movimiento circular, porque la región de aire y la esfera de fuego por las que pasa *a* se mueven, según Aristóteles, con movimiento circular. Si no se movieran así, *a* se elevaría siguiendo la línea *ab*; pero puesto que *b* se traslada entre tanto, por el movimiento circular diario, al punto *c*, es evidente que cuando *a* se eleva describe la línea *ac*, y que el movimiento de *a* está compuesto de un movimiento rectilíneo y otro circular. El movimiento de la flecha será de la misma clase, como se ha dicho; será una composición o mezcla de movimiento (composition ou mixcion de movemens)¹⁶...*

Así, de la misma forma que a una persona que está en un barco en movimiento cualquier movimiento rectilíneo respecto del barco le parece rectilíneo, a una persona en la Tierra la flecha le parecerá que cae verticalmente al punto de donde fue lanzada. El movimiento le parecería el mismo a un observador sobre la Tierra tanto si esta girara como si estuviera en reposo. «Concluyo, pues, que es imposible demostrar por cualquier observación que los cielos se

muevan con movimiento diario y que la Tierra no se mueva de esa forma.» Esta concepción de la composición de los movimientos se iba a convertir en una de las más fecundas en la dinámica de Galileo.

Las objeciones «de razón» contra el movimiento de la Tierra provenían principalmente del principio de Aristóteles, utilizado más tarde por Tycho Brahe contra Copérnico, de que un cuerpo elemental podía tener únicamente un sólo movimiento que, para la Tierra, era rectilíneo y hacia abajo. Oresme afirmó que todos los elementos, excepto los cielos, podían tener dos movimientos naturales, siendo uno la rotación en círculo cuando estaban en su lugar natural, y el otro el movimiento rectilíneo por el que volvían a su lugar natural cuando habían sido desplazados de él. La *vertu* que movía a la Tierra en forma de rotación era su «naturaleza» o «forma», igual que la que la movía rectilíneamente hacia su lugar natural. A la objeción de que la rotación de la Tierra destruiría la astronomía, Oresme replicaba que todos los cálculos y tablas serían los mismos de antes.

Los principales argumentos positivos que Oresme adujo en favor de la rotación de la Tierra se centraban todos ellos en que era más sencilla y más perfecta la rotación que la otra alternativa, anticipándose una vez más notablemente a los argumentos de inspiración platónica que iban a ser utilizados por Copérnico y Galileo. Si la Tierra tenía un movimiento de rotación, decía, todos los movimientos celestes aparentes tendrían lugar en el mismo sentido, de Este a Oeste; la parte habitable del globo estaría en su

lado derecho o noble; los cielos gozarían del estado más noble de reposo y la base de la Tierra se movería; los cuerpos celestes más alejados harían sus revoluciones proporcionalmente más despacio que los más cercanos al Este, en vez de más rápidamente, como ocurría en el sistema geocéntrico. Además,

todos los filósofos dicen que algo realizado por muchas o grandes operaciones que pudiera ser realizado por menos o menores sería realizado en vano. Y Aristóteles dice... que Dios y la naturaleza no hacen nada en vano... Y así, puesto que todos los efectos que vemos pueden ser producidos y todas las apariencias pueden ser salvadas por una pequeña operación, a saber, el movimiento diario de la Tierra, que es muy pequeño comparado con los cielos, sin multiplicar así operaciones que son tan diversas y exageradamente grandes, se sigue que Dios y la naturaleza habrían ordenado y realizado esas operaciones para nada, y esto no es adecuado, según el dicho.

Entre las ventajas de la sencillez se contaba la de que la novena esfera ya no era necesaria.

A lo largo de su estudio, Oresme, que después de todo era obispo de Lisieux, tuvo en cuenta el apoyo dado aparentemente por muchos pasajes de la Escritura al sistema geostático, pero los había dado la vuelta señalando, por ejemplo: «Se puede decir que ella (*scil.*, la Escritura) se conforma a la manera del lenguaje humano habitual, de la misma forma que lo hace en otros lugares, como en donde se escribe que Dios se arrepintió y que se encolerizó y luego se calmó, y

cosas del mismo tipo, que no son en absoluto de hecho tales como la letra las pone.» De nuevo esto nos recuerda a Galileo, y Oresme trata con el mismo talante el conocido problema del milagro de Josué y afirmó que no podían encontrarse argumentos contra el movimiento de la Tierra.

Cuando Dios realiza algún milagro, se debe suponer y afirmar que lo hace sin turbar el curso normal de la naturaleza más de lo mínimo necesario para el milagro. Y así, si se puede decir que Dios alargó el día en tiempos de Josué deteniendo solamente el movimiento de la Tierra o de la región inferior, que es tan pequeña, en realidad un mero punto comparada con los cielos, sin hacer que todo el universo, excepto este pequeño punto, haya sido sacado de su curso y orden habituales, y de la misma manera los cuerpos celestes, entonces esto es mucho más razonable... y se puede decir lo mismo respecto del Sol, que volvió atrás en su curso en tiempos de Ezequías.

Después de haber pasado revista a todos los argumentos que adujo contra la cosmología aceptada entonces, es algo sorprendente hallar que Oresme concluya su capítulo retornando a ella una vez más.

Sin embargo, todos defienden, y yo lo creo, que ellos (*scil.*, los cielos) se mueven y no la Tierra: porque Dios fijó la Tierra, de forma que no se mueve (*Deus enim firmavit orbem terre, qui non commovebitur*)¹⁷, sin que obsten las razones para lo contrario, porque estos son argumentos persuasivos que no prueban evidentemente. Pero considerando todo lo que se ha dicho, se podría creer, a partir de

ello, que la Tierra se mueve y no los cielos, y que no hay nada evidente para lo contrario. En todo caso, esto parece *prima facie* tan contrario a la razón natural como los artículos de nuestra fe, o más así, todos o varios. Y así lo que he dicho por diversión (*par esbatement*) puede adquirir de este modo un valor para confundir y poner a prueba a quienes quieren usar la razón para poner en cuestión nuestra fe.

¿Estaba relacionada esta última observación con el propósito que Oresme decía, en el último capítulo, que le había movido a escribir *Le livre du ciel*: «Para estimular, excitar y mover los corazones de los jóvenes de fina y noble inteligencia y con deseos de saber, de manera que estudien para contradecirme y corregirme, por amor y afección a la verdad»? En la cuestión, tan delicada, tan fundamental y tan apasionada en el pensamiento occidental desde la entrada del nuevo Aristóteles en el siglo XIII hasta las controversias de Galileo, de la relación entre la razón y la revelación, entre la cosmología de la ciencia natural y la cosmología de la Escritura, Oresme parece haber adoptado una posición no inhabitual entre sus contemporáneos que eran a la vez creyentes cristianos y escépticos filosóficos. Estaba preparado para someter incondicionalmente la razón a la revelación y al mismo tiempo utilizar la razón para confundir a la razón. «Y digo y propongo todo esto sin insistencia, con gran humildad y temor de corazón, saludando siempre la majestad de la fe católica, y con el fin de poner a prueba la curiosidad y la presunción de quienes, quizá, quisieran denigrarla o atacarla o investigar demasiado temerariamente para su confusión.»

Pero sean cuales fueran las razones por las que Oresme rechazó la cosmología del movimiento de la Tierra a cuyo apoyo dio tantos argumentos, no deja dudas sobre cuál es su opinión definitiva. «Pero de hecho nunca ha habido y nunca habrá sino un único universo corpóreo», declaraba en el capítulo 24 del libro 1 de *Le livre du ciel*; ese universo era el geostático de Aristóteles y Ptolomeo aceptado entonces. Y en verdad, como Oresme comprendió bien, ninguno de sus argumentos probaba positivamente el movimiento de la Tierra; declaró únicamente, como Galileo iba a declarar tres siglos más tarde, que había demostrado que era imposible probar lo contrario. Pero la concepción del movimiento de Oresme no contenía las potencialidades dinámicas que Galileo iba a explotar, aunque sin éxito, en la disputa cosmológica. Su concepto del movimiento relativo se asemejaba de hecho al de Descartes al ignorar lo que tenía que ser llamado las propiedades de inercia de la materia. No le proporcionaba ningún criterio para decidir, desde el punto de vista de la dinámica, entre los sistemas astronómicos posibles e imposibles.

Alberto de Sajonia decía en sus *Quaestiones in Libros de Céelo et Mundo*, libro 2, cuestión 26:

No podemos de ninguna forma, por el movimiento de la Tierra y el reposo del cielo, salvar las conjunciones y oposiciones de los planetas, ni los eclipses del Sol y de la Luna.

Pero de hecho, como decía Oresme en el libro 2, capítulo 25 de su comentario, al señalar que la Astrología no se vería afectada por la

rotación de la Tierra, «todas las conjunciones, oposiciones, constelaciones, figuras e influencias de los cielos serían justamente como son en todos los sentidos..., y las tablas de los movimientos y todos los otros libros serían tan verdaderos como lo son ahora, excepto solamente que se diría que el movimiento diario es aparente en los cielos y real en la Tierra». Fue por razones filosóficas y físicas por lo que los astrónomos continuaron utilizando la hipótesis geostática, y los filósofos de la naturaleza no hicieron más que jugar con alternativas. Nicolás de Cusa (1401-1464), por ejemplo, en el siglo siguiente, sugirió que cada veinticuatro horas la octava esfera giraba dos veces alrededor de su eje, mientras la Tierra lo hacía una vez. El tratado de Oresme no fue impreso nunca y no se sabe si Copérnico llegó a conocerlo. El problema de la pluralidad de los mundos en el que, por ejemplo, Leonardo da Vinci se inclinó del lado de Nicolás de Cusa contra Alberto de Sajonia, continuó levantando apasionadas polémicas al final del siglo XV y mucho después, y estos autores fueron leídos en el norte de Italia cuando Copérnico estaba en Bolonia y Padua. Cusa había dado un giro platónico a la dinámica de Buridán al atribuir la constancia de la rotación celeste a la forma perfectamente esférica de las esferas. El movimiento circular de una esfera sobre su centro, decía en su *De Ludo Globi*, debía continuar indefinidamente, y de la misma manera que el movimiento dado a una bola de billar continuaría indefinidamente si la bola fuera una esfera perfecta, Dios tuvo solamente que dar a la esfera celeste su *impetus* original, y ella ha continuado girando desde siempre y ha conservado en movimiento a

las otras esferas. Esta explicación fue adaptada para su sistema por Copérnico. Copérnico, dando a la Tierra y a los planetas un movimiento anual alrededor del Sol, ofreció una alternativa matemática y física a la de Ptolomeo. Cuando estudia la gravitación y los otros problemas físicos implicados, su obra aparece como un desarrollo directo de la de sus predecesores.

1.4. La física matemática al final de la Edad Media

Uno de los cambios más importantes que facilitó el empleo creciente de la Matemática en la Física fue el introducido por la teoría de que todas las diferencias reales podían ser reducidas a diferencias en la categoría de la cantidad; que, por ejemplo, la intensidad de una cualidad, como la del calor, podía medirse exactamente de la misma manera como podía serlo la magnitud de una cantidad. Este cambio es el que distinguió principalmente la física matemática del siglo XVII de la física cualitativa de Aristóteles. Fue comenzado por los escolásticos de la última parte de la Edad Media.

Como ocurrió con muchos conceptos en la Edad Media, el problema fue estudiado primero en el contexto teológico, y los principios elaborados en él fueron luego aplicados a la Física. Fue Pedro Lombardo quien planteó el problema al afirmar que la virtud teológica de la caridad podía aumentar y disminuir en una persona y ser más o menos intensa en momentos diferentes. ¿Cómo se podía entender esto? Aparecieron dos escuelas de pensamiento, una que defendía las ideas de Aristóteles respecto de las relaciones de la cualidad a la cantidad, y otra que se oponía a ellas.

Para Aristóteles la cantidad y la cualidad pertenecían a categorías absolutamente distintas. Un cambio de la cantidad, el crecimiento, por ejemplo, era producido por la adición de partes homogéneas o continuas (longitud) o discontinuas (número). La mayor contenía en acto y realmente a la menor y no había cambio de especie. Aunque una cualidad, por ejemplo, el calor, podía existir en grados diferentes de intensidad, un cambio de cualidad no era producido por la adición o sustracción de partes. Si un cuerpo caliente se añadía a otro el conjunto no se hacía más caliente. Por tanto, un cambio de intensidad en una cualidad implicaba la pérdida de un atributo, esto es, una especie de calor, y la adquisición de otra. Esta era la opinión, por ejemplo, de Tomás de Aquino.

Quienes adoptaron en el siglo XIV la posición opuesta a Aristóteles en esta discusión de la relación de la cualidad a la cantidad, o, como fue llamada, de la «intensión y remisión de las cualidades o formas» (*intensio et remissio qualitatum seu formarum*), defendían que cuando dos cuerpos calientes eran puestos en contacto se añadían no sólo los calores, sino también los cuerpos. Si fuera posible abstraer el calor de un cuerpo y añadirlo por separado al otro cuerpo, este último se haría más caliente. De la misma manera, si se pudiera abstraer la gravedad de un cuerpo y añadirla a la masa de otro cuerpo, este último se haría más pesado. Se afirmaba, pues, y era apoyado por la autoridad de Scoto y Ockham, que la intensidad de una cualidad como la del calor era susceptible de ser medida en grados numéricos, de la misma forma que la magnitud de una cantidad.

Aristóteles había analizado los fenómenos físicos en especies irreductible y cualitativamente diferentes, pero la física matemática reduce las diferencias cualitativas de las especies a diferencias de estructura geométrica, de número y de movimiento, con otras palabras, a diferencias de cantidad, y para las matemáticas una cantidad es lo mismo que otra. «Afirmo que no existe nada en los cuerpos externos para excitar en nosotros gustos, olores y sonidos, excepto tamaños, formas, números y movimientos ligeros o rápidos», iba a declarar Galileo en su famoso *Il Saggiatore* (cuestión 48) (cf. *infra*, páginas 265-266), emulando la frase igualmente famosa de Descartes: «*Qu'on me dontte Vétendue et le mouvement, et je vais refaire le monde... L'univers entier est une machine où tout se fait par figure et mouvement.*» Se ha de buscar el origen de esta idea en Pitágoras y en el *Timeo* de Platón, que fueron muy conocidos a lo largo de la Edad Media, y fueron los platónicos quienes iban a ser los responsables de su desarrollo en la Edad Media y luego en el siglo XVII.

Grosetesta, por ejemplo, al desarrollar su teoría de la «multiplicación de las especies» (cf. vol. I, pp. 75-76, 96; *supra*, p. 28), distinguió entre la actividad física por la que la especie o *virtus* se propagaba por un medio y las sensaciones de luz o calor que producía cuando afectaba a los órganos de los sentidos apropiados de un ser sensible. La actividad física era independiente, como afirmaba en el *De Lineis*, de «cualquier cosa que pudiera encontrar, fuera algo con percepción sensitiva o sin ella, fuera algo animado o inanimado; pero el efecto varía según el recipiente»¹⁸. Porque,

seguía, «cuando es recibido por los sentidos este poder produce una operación en cierto modo más espiritual y más noble; cuando es recibido, al contrario, por la materia produce una operación material, como el Sol por el mismo poder produce efectos diferentes en sujetos distintos, porque endurece el barro y funde el hielo». Grosetesta en este pasaje estaba de hecho implicando una distinción entre cualidades primarias y secundarias de la misma forma sofisticada como fue establecida en el siglo XVII; la distinción llegó a ser significativa metodológica y metafísicamente en la Física cuando las cualidades primarias fueron atribuidas a una actividad física que no requería ser observable directamente (cf. *infra*, pp. 130, 267 y ss.).

Grosetesta concibió el modo de operación de la sustancia, y su poder, material fundamental, que afirmaba era la luz, realizándose por medio de una sucesión de pulsos u ondas por analogía con el sonido, e intentó expresar esa actividad y sus efectos diversificados de forma matemática (cf. vol. I, p. 99). Roger Bacon, Witelo y Teodorico de Freiberg hicieron una distinción similar entre la luz como sensación y la luz como actividad física externa que podía ser expresada geométricamente. Aunque parece que ningún autor medieval concibiera la idea fundamental de que los diferentes colores percibidos estaban relacionados con algo correspondiente a la «longitud de onda» de la luz, los autores de obras de óptica propusieron que las diferencias de los efectos cualitativos de la luz estaban producidas por diferencias cuantitativas en la misma luz. Witelo y Teodorico de Freiberg, por ejemplo, dijeron que los colores

del espectro —cada uno era una especie diferente según la opinión estrictamente aristotélica— estaban producidos por el progresivo debilitamiento de la luz blanca debido a la refracción (cf. volumen I, pp. 105-106). Grosetesta relacionó la intensidad de la iluminación y del calor con el ángulo en que eran recibidos los rayos y con su concentración. Juan de Dumbleton iba a intentar formular una ley cuantitativa que relacionaba la intensidad de la iluminación con la distancia.

Como Roger Bacon expuso en su *Opus Majus* (parte 4, distinción 1, capítulo 2), «todas las categorías dependen de un conocimiento de la cantidad que estudia la Matemática, y, por tanto, toda la excelencia de la Lógica depende de la Matemática». También se convirtió en un lugar común estudiar en las obras de Medicina la sugerencia de Galeno de que el calor y el frío podían ser representados en grados numéricos. Existía una tendencia general en muchos campos diferentes para encontrar los medios de representar las diferencias cualitativas por medio de conceptos que pudieran ser expresados cuantitativamente y pudieran ser manipulados por las Matemáticas. El interés de los escolásticos raramente estaba dirigido puramente a la resolución de problemas científicos concretos. Los escolásticos estuvieron casi siempre interesados primordialmente por alguna cuestión de principio o de método en la filosofía de la naturaleza, y si se abordaron problemas científicos concretos, fue casi siempre, por decirlo así, accidentalmente como medio de ilustración de un tema cuasi filosófico más general. Sin embargo, es posible ver en las discusiones del siglo XIV el origen de algunos de los procedimientos

más eficaces de la física matemática que sólo fueron completamente efectivos en el siglo XVII. Al mismo tiempo, el movimiento, respecto del cual había sido impotente la geometría griega concebida estáticamente, era estudiado por vez primera matemáticamente, conduciendo así a la fundación de la ciencia de la cinemática, esto es, al análisis del movimiento en términos de distancia y tiempo.

Los nuevos métodos de la física matemática fueron desarrollados en primer lugar en conexión con la idea de las relaciones funcionales. Esto es el complemento natural de una concepción sistemática de las variaciones concomitantes entre causa y efecto; expresando el fenómeno que debía ser explicado (la variable dependiente como la llamamos ahora) como una función algebraica de las condiciones necesarias y suficientes de su producción (las variables independientes), se puede mostrar exactamente cómo están relacionados los cambios de la primera con los de la segunda. Para ser eficaz en la práctica, el método depende de que se hagan medidas sistemáticas, y en el período anterior al siglo XVII éstas fueron pocas y espaciadas, aunque algunas se hicieron, por ejemplo, en la Astronomía, y en la exposición de Witelo de las variaciones sistemáticas de los ángulos de refracción con los ángulos de incidencia de la luz (*vide* volumen I, pp. 101-105). En el siglo XIV la idea de relaciones funcionales fue desarrollada sin medidas efectivas y solamente en principio; ello representaba la extensión del interés de la época por éste y otros aspectos del método científico.

Se desarrollaron dos métodos principales de expresar las relaciones

funcionales. El primero fue el «álgebra de palabras» utilizado en la Mecánica por Bradwardino en Oxford, en el que se conseguía la generalización empleando letras del alfabeto en vez de números para sustituir a las cantidades de la variables, mientras que las operaciones de adición, división, multiplicación, etc., realizadas con estas cantidades, se describían con palabras en vez de ser presentadas con símbolos como en el álgebra moderna (cf. *supra*, pp. 58 y ss.; *infra*, páginas 119-120). Bradwardino fue seguido en este método, en Oxford, por muchos autores de tratados sobre las «proporciones» y por un grupo del Merton College durante la década de 1330 a 1340 conocidos como los *calculatores*, en particular Guillermo de Heytesbury (hacia 1313-1372), Ricardo Swineshead (floreció hacia 1344-1354), autor del *Liber Calculationum*, que era llamado específicamente el *Calculator*¹⁹, y Juan de Dumbleton (floreció hacia 1331-1349). Ninguno de estos autores de Oxford parece haber estado interesado por los aspectos dinámicos del movimiento; de hecho, en apariencia bajo el influjo de Ockham y Bradwardino, Heytesbury y Dumbleton rechazaron específicamente la doctrina de la *virtus impressa*, sin que adoptaran la teoría alternativa del *impetus* de Buridán. Fue en París donde los métodos de Bradwardino se desarrollaron en el contexto de una teoría dinámica física, y todos los autores principales que estudiaron el *impetus* manifiestan su influjo directo y utilizaron su función dinámica: el mismo Buridán, Oresme, Alberto de Sajonia, Marsilio de Inghen.

El objeto de los métodos desarrollados en Oxford —al ser aplicados

al problema de dar expresión cuantitativa a los cambios de cualidad, el problema de la *intensio et remissio qualitatum seu fortnarum* o de la «latitud de las formas» (*latitudo formarum*), como era llamado— era expresar los grados en que una cualidad o «forma» aumentaba o disminuía numéricamente en relación a una escala fijada de antemano. Una «forma» era cualquier cantidad o cualidad variable en la naturaleza; por ejemplo, el movimiento local, el crecimiento y el decrecimiento, cualidades de todo tipo, o la luz y el calor. La intensidad (*intensio*) o «latitud» de una forma era el valor numérico que había que asignarle, y así era posible hablar de la velocidad a la que la *intensio*, por ejemplo, de la velocidad o del calor, cambiaba en relación a otra forma invariable conocida como la «extensión» (*extensio*) o «longitud» (*longitudo*), por ejemplo, la distancia o el tiempo o la cantidad de materia. Se decía que un cambio era «uniforme» cuando, como en el movimiento local uniforme, se recorrían distancias iguales en intervalos sucesivos de tiempo iguales, y «disforme» cuando, como en el movimiento acelerado o retardado, se recorrían distancias desiguales en intervalos de tiempo iguales. Se decía que un cambio «disforme» era «uniformemente disforme» cuando la aceleración o el retraso era uniforme; si no era «disformemente disforme».

Fue esta concepción de la relación entre la *intensio* y la *extensio* la que dio origen en el siglo XIV al segundo método de expresar las relaciones funcionales, un método geométrico por medio de gráficas. Los griegos y los árabes utilizaron algunas veces el álgebra en conexión con la Geometría, y la idea de describir la posición de un

punto respecto de coordenadas rectangulares fue familiar a los geógrafos y astrónomos desde los tiempos clásicos (cf. lámina 1). La representación gráfica de los grados de la *intensio* de una cualidad respecto de la *extensio* por medio de coordenadas rectilíneas se hizo casi común en Oxford y París ya al principio del siglo XIV. Representando la *extensio* por medio de una línea horizontal recta (*longitudo*), se representaba cada grado de la *intensio* correspondiente a una *extensio* determinada por medio de una línea vertical perpendicular (*latitudo vel altitudo*) de altura determinada. La línea que unía las cimas de estas «latitudes» podía adoptar diferentes formas. Por ejemplo, si la velocidad («intensidad o latitud del *movimiento*») fuera representada respecto del tiempo («longitud»), la velocidad uniforme estaría representada por una línea recta horizontal a una altura correspondiente a la velocidad; la velocidad uniformemente disforme (por ejemplo, la aceleración o el retraso uniforme), por una línea recta que hace ángulo con la horizontal; la velocidad disformemente disforme (por ejemplo, la aceleración o retraso variables), por una curva.

Dumbleton fue uno de los primeros en emplear este método geométrico; estudió ese tema en su *Summa Logicae et Philosophiae Naturalis*, un extenso estudio crítico de la mayor parte de los principales temas de la física de su tiempo. Dumbleton, en la segunda parte de esa importante obra²⁰, realizó una interesante distinción entre un cambio de cualidad «real y nominal», afirmando que de hecho ninguna especie de cualidad cambiaba realmente, sino que cada grado de intensidad era una especie diferente; los

métodos matemáticos daban solamente una representación meramente cuantitativa y «nominal» de esas diferencias. En la quinta parte de la *Summa* aplicó el método al problema de la variación de la intensidad o fuerza de la acción de la luz con la distancia de la fuente. Hay pocos autores de cualquier época cuyos argumentos sean tan difíciles de seguir como los de Dumbleton, pero en el curso de una serie de proposiciones, objeciones, objeciones a las objeciones, que se suceden casi inacabablemente, comenzó el análisis de algunas cuestiones básicas de la óptica que no fueron resueltas hasta el siglo XVII. Decía que la intensidad de iluminación de un punto determinado era directamente proporcional a la potencia de la fuente luminosa e inversamente proporcional a la «densidad» del medio. Para una fuente y un medio determinado decía que la intensidad de la iluminación disminuía con la distancia, pero no de modo «uniformemente disforme», esto es, no en una proporción simple. Fue Kepler quien en su *Ad Vitellionem Paralipomena* (1604) formuló por vez primera la ley fotométrica, según la cual la intensidad de la iluminación es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia de la fuente (*vide infra*, pp. 175-176). El método gráfico para representar las «latitudes de las formas» fue utilizado en París en relación con los problemas cinemáticos por Alberto de Sajonia y Marsilio de Inghen, pero los progresos más notables fueron realizados por Oresme. Hay muchos ejemplos de la originalidad de Oresme como matemático; concibió la noción de potencias fraccionarias, desarrolladas más tarde por Stevin (cf. *infra*, p. 119), y dio reglas para operar con ellas.

Se ha pretendido que se anticipó a Descartes en la invención de la geometría analítica. Dejando aparte el oscuro problema de si Descartes tenía algún conocimiento efectivo directo o indirecto de la obra de Oresme, es evidente que el mismo Oresme perseguía otros fines que los de los matemáticos del siglo XVII.

Oresme, siguiendo la *praxis* habitual, representó la *extensio* por una línea recta horizontal e hizo la altura de las perpendiculares proporcionales a la *intensio*. Su propósito era representar la «cantidad de una cualidad» por medio de una figura geométrica de un área y forma equivalentes. Afirmó que las propiedades de la figura podían representar propiedades intrínsecas a la misma cualidad, aunque solamente cuando éstas permanecían características invariables de la figura durante todas las transformaciones geométricas. Incluso sugirió la aplicación de este método a figuras de tres dimensiones. La *longitudo* horizontal de Oresme no era estrictamente equivalente a la abscisa de la geometría analítica cartesiana; no estaba interesado en describir la posición de los puntos respecto de coordenadas rectilíneas, sino en la figura misma. En su obra no hay asociación sistemática de una relación algebraica con una representación gráfica, en la que una ecuación de dos variables determina una curva específica formada por valores variables simultáneamente de *longitudo* y *latitudo*, y viceversa. Sin embargo, su obra fue un paso adelante hacia la invención de la geometría analítica y hacia la introducción en la Geometría de la idea de movimiento de la que había carecido la geometría griega. Empleó correctamente su método de representar

el cambio lineal de la velocidad.

Según la definición dada arriba, la velocidad de un cuerpo que se mueve con aceleración uniforme sería uniformemente disforme respecto del tiempo. Tomando la aceleración como «la velocidad de una velocidad», Heytesbury, en sus *Regulae Solvendi Sophismata*, definió la aceleración uniforme y el retardo uniforme muy claramente, como un movimiento en el que se adquirirían, o perdían, incrementos iguales de velocidad en períodos iguales de tiempo. También hizo un análisis y dio una definición de la velocidad instantánea, y dio como medida de ella (como iba a hacer más tarde Galileo) el espacio que *sería recorrido* por un punto si éste pudiera moverse durante un cierto tiempo a la velocidad que tenía en el instante dado. Utilizando esta definición y otras similares, Heytesbury y sus contemporáneos del Merton College dieron descripciones cinemáticas de varias formas de movimiento, una de las cuales iba a manifestarse como teniendo una significación particular. Un poco antes de 1335 (fecha de las *Regulae* de Heytesbury) se había descubierto en Oxford que un movimiento uniformemente acelerado o retardado es equivalente, por lo que respecta al espacio recorrido en un tiempo determinado, a un movimiento uniforme cuya velocidad es igual absolutamente a la velocidad instantánea poseída por el movimiento uniformemente acelerado o retardado en el instante medio del tiempo. Esto fue demostrado aritméticamente por Heytesbury²¹, Ricardo Swineshead y Dumbleton, y puede ser denominada la Regla de la Velocidad Media del Merton College. Oresme propuso más tarde, en su *De*

Configurationibus Intensionum, o De Configuratione Qualitatum, parte 3, capítulo 7, la siguiente demostración geométrica de esta regla. Decía:

Toda cualidad uniformemente disforme posee la misma cantidad, como «i informara uniformemente al mismo sujeto según el grado del punto medio. Por «según el grado del punto medio» entiendo: si la cualidad es lineal. Para la cualidad de una superficie sería preciso decir: «según el grado de la línea media»...

Demostraremos esta proposición para una cualidad lineal.

Sea una cualidad que puede ser representada por un triángulo, ABC (figura 2). Es una cualidad uniformemente disforme que, en el punto B, se hace igual a cero. Sea D el punto medio de la línea que representa al sujeto; el grado de intensidad que afecta a este punto está representado por la línea DE. La cualidad que tendría en todas sus partes el grado así determinado puede ser representada por el cuadrilátero AFGB... Pero por la proposición 26 de Euclides, libro I, los dos triángulos EFC y EGB son iguales. El triángulo ABC, que representa la cualidad uniformemente disforme, y el cuadrilátero AFGB, que representa la cualidad uniforme, según el grado del punto medio, son entonces iguales. Las dos cualidades que pueden ser representadas, una por el triángulo y otra por el cuadrilátero, son entonces también iguales una a otra, y esto es lo que se había propuesto para demostrar.

El razonamiento es exactamente igual para una cualidad

uniformemente disforme que acaba en un cierto grado...

Sobre el tema de la velocidad se puede decir exactamente lo mismo que de una cualidad lineal, solamente, en vez de decir «punto medio», sería preciso decir: «instante medio del tiempo de duración de la velocidad».

Es evidente entonces que toda cualidad uniformemente disforme o cualquier velocidad es igualada por una cualidad o velocidad uniforme ²².

El estudio de los problemas cinemáticos en el siglo XIV permaneció casi enteramente en el ámbito de lo teórico. Se planteaban problemas *secundum imaginationem*, especialmente en Oxford, como posibilidades imaginarias para el análisis teórico y sin aplicación empírica.

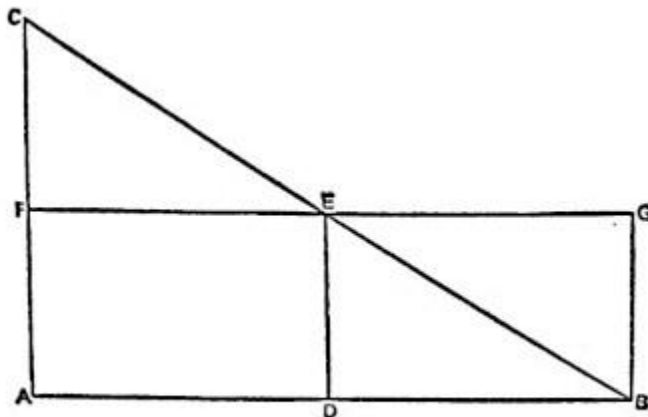


Fig. 2

En París el contexto físico y dinámico del estudio dirigió el interés hacia la cinemática del movimiento natural real, pero éste fue

estudiado extensamente sin referencia a la observación o al experimento. Un buen ejemplo de ello es el estudio de la cinemática de los cuerpos que caen libremente realizado por Alberto de Sajonia en sus *Quaestiones in Libros de Caelo* (libro 2, cuestión 14). Después de tratar varios modos posibles por los que la velocidad natural de un cuerpo que cae libremente podía ser aumentada en el tiempo y en el espacio recorrido, concluyó que la velocidad de la caída aumentaba en proporción directa a la distancia de la caída²³. Esta opinión errónea iba también a seducir a Galileo antes de que se decidiera por la solución correcta, a saber, que la velocidad aumentaba en proporción directa al tiempo de la caída, o con otras palabras, que un cuerpo que cae libremente se movía según la definición de Heytesbury de la velocidad uniformemente acelerada (*vide infra*, pp. 134-136). Esta solución correcta estaba, por otra parte, implícitamente admitida por Alberto de Sajonia, cuando decía, como Buridán, que cuanto más largo era un movimiento tanto más *Impetus* se requería y así se adquiría más velocidad. Pero no dijo esto al estudiar el problema cinemático y no hay evidencia de que fuera consciente de las implicaciones cinemáticas de su dinámica. La ley correcta de la aceleración en la caída libre fue dada, con mucha confusión, por Leonardo da Vinci y, más tarde, de forma inequívoca, por el dominico español Domingo de Soto, y, finalmente, con las deducciones matemáticas, por Galileo.

Ciertamente, los dos primeros de estos autores basaron su obra, directa o indirectamente, sobre la de sus predecesores del siglo XIV de Oxford y París, y Galileo tenía también un conocimiento de la

cinemática y de la dinámica del siglo XIV. Los *calculatores* del Merton College gozaron de hecho durante un largo período de gran popularidad, primero en París y en Alemania; luego, en Italia, y, en particular, en Padua en los siglos XV y XVI, y de nuevo en París en el XVI. Entre alrededor de 1480 y 1520, las nuevas prensas de imprenta, especialmente en Venecia y en París, publicaron ediciones de las obras más importantes de Heytesbury, Ricardo Swineshead y Bradwardino, y de Buridán y de Alberto de Sajonia. Las obras principales del mismo Oresme no fueron publicadas, pero se podía disponer indirectamente del conocimiento de sus teoremas cinemáticos. Galileo en sus *Juvenilia*, tres ensayos tempranos basados en sus lecturas principalmente de textos jesuitas, en Pisa, menciona entre muchos otros autores medievales sobre Física a Burley, Heytesbury, Calculator y Marliani. Esto no implica, por supuesto, que él leyera sus obras. Mencionaba también a Ockham y Soto, y a Filopón y Avempace; pero no aparecían los nombres de Buridán, Alberto de Sajonia y Oresme.

Resolviendo las dudas de Alberto de Sajonia, Domingo de Soto consideró la velocidad de la caída libre como proporcional al tiempo y declaró que ella era «uniformemente disforme», esto es, uniformemente acelerada. El movimiento violento de un proyectil disparado verticalmente hacia arriba también lo consideró como siendo «uniformemente disforme», pero en este caso uniformemente retardado. Aplicó a ambos la Regla de la Velocidad Media relacionando la distancia y el tiempo, trascendiendo así la diferencia cualitativa entre el movimiento natural y violento por medio de la

matemática²⁴. Cuando finalmente Galileo estableció la ley correcta de la caída libre y elucidó claramente «la relación íntima entre el tiempo y el movimiento», como dijo en el Tercer Día de su *Dos ciencias nuevas* (1638), utilizó el teorema de Oresme para establecer su prueba (*vide infra*, p. 139).

Existe, sin embargo, la diferencia de todo un mundo entre el estudio de Galileo sobre la caída libre y el de sus predecesores escolásticos, y las principales direcciones de los intereses de estos últimos no pueden ser ilustrados mejor que al compararlos. Donde los escolásticos del siglo XIV habían estudiado tipos posibles de movimiento con sólo referencias muy casuales a la realidad empírica, Galileo dirigió su atención firmemente hacia el movimiento observado realmente en la naturaleza como el objeto real cuya elucidación era el fin principal, si no el único, del análisis cinemático teórico. Entre el siglo XIV y el XVII, los pensadores científicos trasladaron su atención principal de las cuestiones de principio y de posibilidad a los hechos reales. «Porque cualquiera puede inventar un tipo arbitrario de movimiento y estudiar sus propiedades», escribía Galileo en un pasaje famoso de su Tercer Día de las *Dos ciencias nuevas*; y las propiedades que poseían estos movimientos y curvas en virtud de sus definiciones podían ser interesantes, aunque no se observaran en la naturaleza. «Pero hemos decidido considerar los fenómenos de los cuerpos que caen con una aceleración, tal como ocurre realmente en la naturaleza, y hacer que esta definición del movimiento acelerado exhiba los rasgos principales del movimiento acelerado observado.» Y concluía

que había eventualmente tenido éxito al hacerlo y estaba confirmado en esta creencia por el acuerdo exacto de su definición teórica con los resultados de los experimentos con una bola que caía por un plano inclinado (*vide infra*, pp. 134 y ss.).

El intento del siglo XIV de expresar el equivalente cuantitativo de las diferencias cualitativas llevó a descubrimientos originales respecto de la Matemática y de los hechos físicos. Los últimos se ampliaron gracias al fomento dado a las medidas físicas, aunque en esto las ideas iban por delante de las posibilidades prácticas determinadas por el alcance y exactitud de los instrumentos disponibles. Por ejemplo, Ockham dijo que el tiempo podía ser considerado objetivamente sólo en el sentido de que, enumerando las posiciones sucesivas de un cuerpo en movimiento con movimiento uniforme, este movimiento podía ser empleado para medir la duración del movimiento o reposo de otras cosas. El movimiento del Sol podía ser utilizado para medir los movimientos terrestres; pero el último punto de referencia de todos los movimientos era la esfera de las estrellas fijas, que era el movimiento más rápido y más cerca de lo uniforme que existía. Otros autores elaboraron sistemas para medir el tiempo en fracciones (*minutae*), y ya a principios del siglo XIV era habitual la división de la hora en minutos y segundos. Aunque los relojes mecánicos se habían inventado en el siglo XIII, eran muy inexactos para medir pequeños intervalos de tiempo, y continuaron siendo utilizados el reloj de agua y el de arena. La medida exacta de intervalos muy cortos de tiempo no fue posible antes del invento del reloj de péndulo, por Huygens, en 1657.

Los médicos también estaban familiarizados con la representación del calor y del frío por grados numéricos. Galeno había sugerido como punto cero un «calor neutro» que no era ni frío ni calor. Debido a que el único medio para determinar el grado de calor era la percepción sensible directa y a que una persona de temperatura más caliente percibiría este «calor neutro» como frío, y viceversa, Galeno había sugerido como grado de calor neutro patrón una mezcla de cantidades iguales de lo que él consideraba las sustancias más calientes (agua hirviendo) y más frías (hielo) posibles. A partir de estas ideas, los médicos árabes y latinos desarrollaron la idea de escalas de grados; una escala popular era la que se extendía de 0° a 4° de calor o frío. También se supuso que los medicamentos tenían algo análogo al efecto de calentar o enfriar y recibieron un lugar en la escala. Los filósofos de la naturaleza adoptaron una escala de 8° para cada una de las cualidades primarias. Aunque en estos ensayos de estimar los grados de calor se sabía que el calor provocaba la expansión, el único termómetro era todavía los sentidos. Además, se puede detectar una dificultad conceptual en el intento de medir el calor y el frío. Únicamente cuando la concepción clásica de pares opuestos —calor, frío; arriba, abajo, y todos los demás— fue sustituida por el concepto de medidas lineales homogéneas fue posible un sistema de medidas viable. Dada la Física en su conjunto. El cambio se realizó primero en la Mecánica, y la Termometría moderna siguió ese ejemplo (cf. *infra* página 140, nota 29).

Además del reloj de agua, del reloj de arena, del reloj mecánico, de

los instrumentos astronómicos ya descritos y de «instrumentos matemáticos» tales como la regla de rasero, la escuadra, el compás y compás de división, los únicos otros instrumentos de medida científica disponibles en los siglos XIV y XV eran, de hecho, las reglas, medidas, balanzas y pesos para empleo de las unidades de longitud, capacidad y peso reconocidos en el comercio. Las balanzas de brazos iguales y del tipo romana datan de la Antigüedad y fueron utilizadas por los alquimistas y aquilatadores en la Metalurgia.

Durante el siglo XV se hicieron más intentos de utilizar en la Ciencia la medida y el experimento, cuando la dirección científica pasó de las universidades anglo-francesas a Alemania e Italia. En el siglo XIV se habían realizado ensayos para expresar gráficamente sobre un mapa la relación entre los elementos y para establecer las proporciones de los elementos y de los grados de las ciencias primarias para cada uno de los metales, espíritus (mercurio, azufre, arsénico, sal, amoníaco), etc. En el cuarto libro de su *Idiota*, titulado «De Staticis Experimentis», Nicolás de Cusa sugirió que esos problemas podían ser resueltos por medio de la pesada. Sus conclusiones implican la idea de la conservación de la materia:

Idiota.— Pesando un trozo de madera, y quemándolo completamente y pesando luego las cenizas, se puede conocer cuánta agua había en la madera, porque no hay nada que tenga un peso más pesado que el agua y la tierra. Se conoce, además, por los diferentes pesos de la madera en el aire, en el agua y en el aceite cuánto más pesada es el agua que está en la madera, o cuánto más ligera, que el agua pura de fuente, y así cuánto aire

hay en ella. Así por la diferencia del peso de las cenizas, cuánto fuego hay en ellas: y de los elementos puede ser conseguido por una conjetura más aproximada, aunque la exactitud no sea nunca alcanzable. Y lo que he dicho de la madera se puede hacer de la misma forma con las hierbas, la carne y otras cosas. Orador.— Hay un dicho que dice que no se da ningún elemento puro, ¿cómo puede ser probado esto por la balanza?

Idiota.— Si una persona pusiera cien libras de tierra en una gran maceta, y tomara entonces algunas hierbas y semillas, y las plantara o sembrara en esa maceta, y luego las dejara crecer tanto tiempo hasta que sucesivamente y poco a poco obtuviera un centenar de libras de ellas, hallaría que la tierra no había disminuido sino muy poco cuando la pesara de nuevo; por lo que podría concluir que todas las hierbas dichas habían obtenido su peso del agua. Por tanto, las aguas que habían sido engrosadas (o impregnadas) en la tierra atraieron una terrestreidad, y por la acción del sol sobre la hierba fueron condensadas en hierba. Si se redujeran a cenizas estas hierbas, ¿no podrías tú adivinar, por la diversidad de los pesos de todo, cuánta tierra encontrarías más de las cien libras, y concluirías entonces que el agua produjo todo eso? Porque los elementos son convertibles unos en otros por partes, como observamos en el cristal puesto en la nieve, donde veremos el aire condensado en agua y correr por éste²⁵.

El *Statick Experiments* contenía otras varias sugerencias sobre el

empleo de la balanza. Una de éstas, la comparación de los pesos de hierbas con los de la sangre u orina, estaba encaminada al conocimiento de la acción de los medicamentos. Esto fue investigado de modo diferente en el *Liber Distillandi*, publicado por Jerónimo Brunschwig en Estrasburgo en 1500, en el que se reconocía que la acción de las drogas dependía de principios puros, «espíritus» o «quintaesencias» que podían ser extraídos por la destilación de vapor y otros métodos químicos. Cusa también sugirió que el tiempo que empleaba un peso determinado de agua en correr por un orificio dado podía ser utilizado como patrón de comparación para las velocidades del pulso. La pureza de muestras de oro y de otros metales, decía, podía ser hallada determinando sus pesos específicos, utilizando el principio de Arquímedes. La balanza podía ser empleada también para medir la «virtud» de una piedra imán que atraía a un trozo de hierro y en la forma de un higrómetro, que consistía en un trozo de lana equilibrando un peso, para medir el «peso» del aire. El mismo procedimiento fue descrito por León Battista Alberti (1404-1472) y por Leonardo da Vinci (1452-1519). Cusa decía que el aire podía ser «pesado» también, determinando el efecto de la resistencia del aire sobre pesos que caían mientras se medía el tiempo por el peso del agua que pasaba por un pequeño orificio.

¿No podría una persona, dejando caer una piedra de una torre alta, y dejando correr el agua por un orificio estrecho a un recipiente al mismo tiempo, y pesando luego el agua que ha pasado, y haciendo lo mismo con un trozo de madera del mismo tamaño, gracias a las

diferencias de peso del agua, madera y piedra, conseguir saber el peso del aire?

Las sugerencias de Cusa eran en ocasiones un poco vagas, y es atormentador el que este último experimento fuera descrito sin referencia a la dinámica de los cuerpos que caen. El médico italiano Giovanni Marliani (muerto en 1483) abordó este problema sugestiva, pero inadecuadamente. Marliani había hecho algunas observaciones sobre la regulación térmica al estudiar la intensidad del calor en el cuerpo humano. Desarrolló la modificación realizada por Bradwardino de la ley del movimiento de Aristóteles. Al criticar la ley aristotélica del movimiento, mencionó experimentos basados en deducciones dinámicas de la estática de Jordano Nemorarius, que se habían conservado vigentes en Oxford y que habían sido dadas a conocer a los italianos por el *Tractatus de Ponderibus* de Blas de Parma (muerto en 1416). Marliani argüía en su *De Proportione Motium in Velocitate* que dos pesos iguales y semejantes en todos los aspectos se moverían, respectivamente, hacia abajo por un plano vertical y por un plano inclinado de la misma altura, con velocidades (inversamente) proporcionales a la longitud de los planos. Pero no determinó las relaciones cuantitativas exactas implicadas. Sus críticas principales de las leyes del movimiento de Bradwardino y de Aristóteles iban dirigidas a señalar su inconsistencia interna, y los experimentos que describió fueron, sin ninguna duda, en su mayor parte, «experimentos mentales».

Georg Peurbach (1423-1461) y Johannes Müller o Regiomontano (1436-1476) realizaron un trabajo mejor en Astronomía. Peurbach,

que regentó una cátedra en Viena, colaboró en una revisión de las *Tablas Alfonsinas*. Descubriendo la ventaja, como habían hecho algunos autores del siglo XIV, de utilizar senos en lugar de cuerdas, compuso una tabla de senos para cada 10 grados. Regiomontano, que conoció la obra de Levi ben Gerson (*vide* vol. I, página 93), escribió un tratado sistemático de Trigonometría que iba a tener una gran influencia, calculando una tabla de senos para cada minuto y una tabla de tangentes para cada grado. Acabó un manual comenzado por Peurbach y que estaba basado en fuentes griegas, el *Epitome in Ptolomaei Almagestum*, que fue impreso en Venecia en 1496. Otra obra de Peurbach, su *Theoricae Novae Planetarum*, publicada en Nüremberg en 1472 ó 1473, es interesante por sus diagramas de los sistemas de esferas sólidas. Bernardo Walther (1430-1504), discípulo- de Regiomontano, con el que colaboró en el observatorio construido en Nüremberg, fue el primero en utilizar para fines de predicción científica un reloj movido por un peso colgante. En este reloj, la rueda de las horas tenía 56 dientes, de manera que cada diente representaba una fracción mayor que un minuto.

La manera concreta, dando por supuesta la importancia primordial de la revolución conceptual que acompañó a la dinámica de la inercia, en que existe continuidad del desarrollo histórico desde la física matemática del siglo XIV a la de los siglos XVI y XVII, constituye un problema delicado sobre el que se ha realizado una gran cantidad de investigaciones. No puede haber problema, como estudiaremos con mayor amplitud más adelante, respecto de las

diferencias básicas de los objetivos y métodos filosóficos asociados con la nueva dinámica, cambios cuya consecución fue obra de Galileo. Pero, comparándola con la física del siglo XVII, la del siglo XIV era limitada tanto en la técnica experimental como en la matemática. El fracaso en poner en práctica habitualmente el método experimental iniciado de forma tan brillante en el siglo XIII y la pasión excesiva por la Lógica, que afectó a la Ciencia en su conjunto, indican que la base fáctica de las discusiones teóricas era en ocasiones muy ligera. La expresión matemática de la intensidad cualitativa en el «arte de las latitudes», como se la llamaba, dio origen así a los mismos excesos ingenuos que los intentos análogos, de los que iba a ser el padre, del mecanismo omnicompetente de los siglos XVII y XVIII. Oresme, por ejemplo, extendió la teoría del *impetus* a la Psicología. Uno de sus seguidores, Enrique de Hesse (1325-1397), mientras dudaba de si las proporciones e intensiones de los elementos de una sustancia dada eran cognoscibles en detalle, consideraba seriamente la posibilidad de la generación de una planta o de un animal a partir del cadáver de otra especie, por ejemplo, de una zorra a partir de un perro muerto. Porque aunque el número de permutaciones y combinaciones era enorme, durante la corrupción de un cadáver las cualidades primarias podían ser alteradas hasta las proporciones en que se presentaban en algún otro ser vivo. Dumbleton y otros autores habían estudiado extensamente latitudes de cualidades morales, como la verdad, la fe y la perfección. Gentile da Foligno (muerto en 1348) aplicó el método a la fisiología de Galeno, y éste fue elaborado en el siglo XV por

Jacobo da Forli y otros que trataron la salud como una cualidad semejante al calor y la expresaron en grados numéricos. Estas aplicaciones de un método, sutilmente elaboradas e inútiles en la práctica, provocó las burlas de humanistas como Luis Vives (1492-1540) y Pico della Mirándola (1463-1494), y hacía gruñir a Erasmo (1467-1536) cuando recordaba las lecciones que tuvo que soportar en la Universidad. El mismo ideal geométrico fue de nuevo expresado por Rheticus en 1540, cuando dijo que la Medicina alcanzaría la perfección a la que Copérnico había llevado a la Astronomía, y luego por Descartes.

1.5. La continuidad de la ciencia medieval y la del siglo XVII

En la actualidad, muchos estudiosos están de acuerdo en que el humanismo del siglo XV, que surgió en Italia y se extendió hacia el Norte, fue una interrupción en el desarrollo de la Ciencia. El «renacimiento de las letras» distrajo la atención por la materia en favor del estilo literario, y, al volverse hacia la Antigüedad clásica, sus devotos pretendieron ignorar los progresos científicos de los tres siglos anteriores. La misma arrogancia absurda que condujo a los humanistas a despreciar y desfigurar a sus predecesores inmediatos por usar construcciones latinas desconocidas de Cicerón y a lanzar la propaganda que, en grados variables, ha cautivado hasta hace muy poco a la opinión histórica, les permitió también tomar prestado de los escolásticos sin confesarlo. Esta costumbre afectó a casi todos los grandes científicos de los siglos XVI y XVII, católicos o protestantes, y ha sido necesaria la obra de un Duhem o de un

Thorndike o de una Maier para demostrar que sus afirmaciones sobre problemas históricos no pueden ser aceptadas como enteramente válidas.

Este movimiento literario realizó algunos servicios importantes a la Ciencia. En último término, quizá el mayor de todos fue la simplificación y clarificación del lenguaje, aunque esto sucediera principalmente en el siglo XVII, cuando se aplicó en particular al francés, pero también, por influjo de la Royal Society, al inglés. El servicio más inmediato fue el de proporcionar los medios de desarrollo de la técnica matemática. El desarrollo y la aplicación física de muchos problemas estudiados en Oxford, París, Heidelberg o Padua, en términos de lógica y de geometría simple, estaban muy limitados por la carencia de matemáticas. Era inhabitual para los estudiantes de la Universidad medieval ir más allá del primer libro de Euclides; y aunque el sistema hindú era conocido, los numerales romanos continuaban siendo usados, aunque no entre los matemáticos, hasta el siglo XVII. Matemáticos competentes, como Fibonacci, Jordano Nemorarius, Bradwardino, Oresme, Ricardo de Wallingford y Regiomontano, estaban, por supuesto, mejor equipados e hicieron contribuciones originales a la Geometría, al Algebra y a la Trigonometría, pero no existía una tradición matemática continuada comparable con la de la Lógica. Las nuevas traducciones realizadas por los humanistas, ofrecidas al público gracias a la imprenta, recientemente inventada, colocó la riqueza de la matemática griega al alcance de la mano. Algunos de estos autores griegos, como Euclides y Ptolomeo, habían sido estudiados

en los siglos anteriores; otros, como Arquímedes, Apolonio y Diofanto, estaban disponibles en traducciones antiguas, pero generalmente no estudiados. Entre las obras de matemática aplicada, la *Cosmographia* de Ptolomeo y su *Geographia* fueron impresas varias veces; pero el *Almagesto* no fue impreso, excepto el resumen por Regiomontano, hasta principios del siglo XVI. Se imprimieron pocas obras árabes de Astronomía. Con mucho, las ediciones más numerosas de un autor fueron las de las obras de Aristóteles, acompañadas frecuentemente con las glosas de Averroes y de otros comentaristas.

Toda la concepción de la naturaleza se vio afectada por el atomismo sistemático hallado en el texto completo del *De Rerum Natura* de Lucrecio, descubierto por un erudito humanista, Poggio Bracciolini, en un monasterio en 1417. Es verdad que las ideas de Lucrecio no eran desconocidas antes de esa fecha. Aparecen, por ejemplo, en las obras de Rabano Mauro, de Guillermo de Conches y de Nicolás de Autrecourt. Pero parece que el poema de Lucrecio era conocido sólo parcialmente, en citas de los libros de los gramáticos. Fue impreso más tarde, en el siglo XV, y desde entonces muchas otras veces.

No sólo las ciencias matemáticas y las físicas, sino también la Biología, se beneficiaron de los textos y traducciones editados por los humanistas. La imprenta humanista hizo fácilmente accesibles las obras de autores que o habían sido, como Celso (floreció en 14-37 d. C.), desconocidas antes, o como Teofrasto, conocidas solamente por fuentes secundarias, y nuevas traducciones de Aristóteles, Galeno e Hipócrates. Este último reemplazó a Galeno

como principal guía médica, con gran ventaja de la práctica empírica. La *Historia Natural* de Plinio fue impresa muchas veces y el *De Materia Medica* de Dioscórides lo fue dos veces, y hubo muchas «ediciones de autores árabes médicos en traducciones latinas: Avicena, Rhazes, Mesue, Serapion. Los nuevos textos actuaron como un estimulante del estudio de la Biología, por lo que fue al principio un camino curioso, porque uno de los motivos más importantes de los estudiosos humanistas, con su adulación excesiva de la Antigüedad, era identificar los animales, plantas y minerales mencionados por los autores clásicos. Las limitaciones de este motivo fueron finalmente puestas de relieve por los estudios auténticamente biológicos que ellos inspiraron, porque éstos revelaron las limitaciones del saber clásico, y esto fue aún más demostrado por la nueva fauna y flora descubierta como resultado de las exploraciones geográficas, por el creciente saber práctico de la Anatomía adquirido por los cirujanos y por los brillantes progresos en la ilustración biológica estimulada por el arte naturalista. Pero el motivo original humanista atrae la atención sobre un rasgo de la ciencia del siglo XVI y de principios del siglo XVII en casi todas sus ramas que los historiadores «de la ciencia de una generación anterior a la actual hubieran estado inclinados a asociarlo más con los siglos anteriores; porque fue precisamente esta reverencia desmesurada respecto de los antiguos, esta devoción por los textos de Aristóteles y de Galeno, la que provocó la hostilidad sarcástica de los científicos de la época que estaban intentando utilizar sus ojos para mirar al mundo de una nueva manera. Y el comienzo de esta

nueva ciencia data del siglo XIII.

Las contribuciones originales principales realizadas durante la Edad Media al desarrollo de la ciencia de la naturaleza en Europa pueden ser resumidas de la forma siguiente:

1. En el campo del método científico, la recuperación de la idea griega de explicación teórica en la Ciencia, y especialmente de la forma «euclidiana» de esa explicación y su empleo en la física matemática, dieron origen a los problemas de cómo construir y verificar o refutar las teorías. La concepción básica de la explicación científica sostenida por los científicos medievales de la naturaleza provenía de los griegos y era esencialmente la misma que la de la ciencia moderna. Cuando un fenómeno había sido exactamente descrito, de manera que sus características eran adecuadamente conocidas, era explicado relacionándolo con un conjunto de principios generales o teorías que abrazaban a todos los fenómenos similares. El problema de la relación entre la teoría y la experiencia planteado por esta forma de explicación científica fue analizado por los escolásticos al desarrollar sus métodos de «resolución y composición». Se ven ejemplos del empleo de los métodos escolásticos de inducción y de experimentación en la óptica y en el magnetismo de los siglos XIII y XIV. Los métodos implicaban observaciones cotidianas, lo mismo que experimentos diseñados especialmente, idealizaciones sencillas y «experimentos mentales», pero también la mención de experimentos imaginarios e imposibles.

2. Otra contribución importante al método científico fue la extensión de la Matemática a todo el campo de la ciencia física, por lo menos en principio. Aristóteles había restringido el empleo de las matemáticas, en su teoría de la subordinación de una ciencia a otra, al distinguir tajantemente los papeles explicativos de las matemáticas y de la «Física». El efecto de este cambio no fue tanto el destruir esta distinción como cambiar el tipo de pregunta que planteaban los científicos. Una razón principal de este cambio fue el influjo de la concepción neoplatónica de la naturaleza como siendo en último término matemática, una concepción que fue explotada por la noción de que la clave del mundo físico debía buscarse en el estudio de la luz. Es verdad que los científicos medievales no llevaron esta concepción hasta el límite, pero comenzaron a mostrar menos interés por la pregunta metafísica o «física» de la causa y a plantear el tipo de pregunta que podía ser respondida por una teoría matemática dentro del ámbito de la verificación experimental. Se ven ejemplos de este método en la mecánica, óptica y astronomía de los siglos XIII y XIV. Fue a través de la matematización de la naturaleza y de la Física como fue sustituido el concepto clásico tan inconveniente de los pares contrapuestos por el concepto moderno de medidas lineales homogéneas.
3. Además de estas ideas sobre el método, aunque conectado con ellas frecuentemente, comenzó a finales del siglo XIII un nuevo enfoque de la cuestión del espacio y del movimiento. Los

matemáticos griegos habían elaborado una matemática del reposo, y se habían realizado progresos importantes en la Estática durante el siglo XIII, progresos facilitados por los métodos de Arquímedes de manipular cantidades ideales, como la longitud de un brazo sin peso de una balanza. El siglo XIV vio los primeros intentos de elaboración de una matemática del cambio y del movimiento. De entre los varios elementos que contribuyeron a esta nueva dinámica y cinemática, fueron las ideas de que el espacio podía ser infinito y vacío, y la de que el universo podía carecer de centro, las que minaron el cosmos de Aristóteles con sus direcciones diferentes cualitativamente y condujeron a la idea del movimiento relativo. Respecto del movimiento, la idea nueva principal fue la del *impetus*, y la característica más significativa de este concepto fue el que se daba una medida de la cantidad de *impetus* según la cual éste era proporcional a la cantidad de materia que había en el cuerpo y a la velocidad imprimida a él. También fue importante la discusión de la persistencia del *impetus* en ausencia de resistencia del medio y de la acción de la gravedad. El *impetus* era todavía una «causa física» en el sentido aristotélico; al considerar el movimiento como un estado que no requería una causalidad eficiente continuada, Ockham aportó otra contribución, quizá relacionada con la idea del siglo XVII, del movimiento de inercia. La teoría del *impetus* fue empleada para explicar muchos fenómenos diferentes, por ejemplo, el movimiento de los proyectiles y de

los cuerpos que caen, el rebote de las pelotas, el péndulo y la rotación de los cielos y la Tierra. La posibilidad de esta última fue sugerida por el concepto de movimiento relativo, y las objeciones a éste, a partir del argumento de los cuerpos separados, fueron replicados con la idea de «movimiento compuesto», propuesta por Oresme. El estudio cinemático del movimiento acelerado comenzó también en el siglo XIV, y la solución de un problema concreto, el de un cuerpo que se movía con aceleración uniforme, iba a ser aplicada más tarde a los cuerpos que caen. También comenzaron en el siglo XIV los estudios sobre la naturaleza del continuo y de los máximos y mínimos.

4. En el terreno de la Tecnología, la Edad Media conoció algunos progresos notables. Comenzando con nuevos métodos de aprovechamiento de la energía animal, hidráulica y del viento, se desarrollaron nuevas máquinas para fines variados, que en ocasiones exigían una precisión considerable. Algunos inventos técnicos, por ejemplo, el reloj mecánico y las lentes de aumento, iban a ser utilizados como instrumentos científicos. Instrumentos de medida, como el astrolabio y el cuadrante, iban a ser enormemente perfeccionados como consecuencia de necesidad de medidas precisas. En la Química se estableció el empleo habitual de la balanza. Se hicieron progresos empíricos, y el hábito experimental condujo al desarrollo de aparatos especiales.
5. En las ciencias biológicas se realizaron algunos progresos

técnicos. Se escribieron obras importantes sobre Medicina y Cirugía, sobre los síntomas de las enfermedades, y se hicieron descripciones de la flora y fauna de distintas regiones. Se inició la clasificación y se facilitó la posibilidad de tener ilustraciones exactas gracias al arte realista. Quizá la contribución más importante de la Edad Media a la biología teórica fue la elaboración de la idea de una escala de la naturaleza animada. En Geología se hicieron observaciones y la auténtica naturaleza de los fósiles fue captada por algunos autores.

6. Se pueden señalar dos contribuciones medievales respecto de la cuestión del objeto y naturaleza de la Ciencia. La primera es la idea, expresada explícitamente por vez primera en el siglo XIII, de que el objeto de la Ciencia era obtener un dominio sobre la naturaleza útil para el hombre. La segunda es la idea, sobre la que insistían los teólogos, de que ni la acción de Dios ni la especulación del hombre podía ser constreñida dentro de los límites de un sistema concreto del pensamiento científico o filosófico. Cualesquiera que pudieran haber sido sus efectos en otras ramas de la Ciencia, la consecuencia de esta idea sobre la ciencia de la naturaleza fue la de poner de relieve la relatividad de todas las teorías científicas y el hecho de que podían ser reemplazadas por otras que tenían más éxito en cumplir los requisitos de los métodos racionales y experimentales.

Así, pues, los métodos experimentales y matemáticos aparecen

como un crecimiento, realizado dentro del sistema medieval de pensamiento científico, que iba a destruir, desde dentro, para brotar finalmente, la física y la cosmología aristotélicas. Aunque la resistencia a la destrucción del antiguo sistema se hizo muy fuerte entre algunos escolásticos tardíos, y en particular entre aquellos cuyo humanismo les había dado una devoción excesiva por los textos antiguos y entre aquellos para quienes el antiguo sistema había sido ligado demasiado estrechamente con doctrinas teológicas, puede haber pocas dudas de que fue el desarrollo de estos métodos experimentales y matemáticos de los siglos XIII y XIV lo que, por lo menos, inició el movimiento histórico de la Revolución científica que culminó en el siglo XVII.

Pero cuando se consideran todos los aspectos, la ciencia de Galileo, Harvey y Newton no fue la misma que la de Grossetesta, Alberto Magno y Buridán. No sólo sus objetivos fueron en unas ocasiones sutilmente y en otras, obviamente distintos y las conquistas de la ciencia del siglo XVII fueron infinitamente mayores; de hecho, ellas no estuvieron conectadas por una continuidad ininterrumpida de desarrollo histórico. Hacia finales del siglo XIV llegó a su término el brillante período de la originalidad escolástica. Durante el siglo y medio siguiente, todo lo que París y Oxford produjeron sobre Astronomía, Física, Medicina o Lógica fueron monótonos epítomes de obras anteriores. En el siglo XV aparecieron en Alemania uno o dos autores originales, Nicolás de Cusa y Regiomontano. En Italia, las cosas fueron mejor, pero más con el nuevo grupo de «artistas-ingenieros», como Leonardo da Vinci, que en las universidades. El

interés y la originalidad intelectual estaban orientados hacia la literatura y las artes plásticas más que hacia la ciencia de la naturaleza.

Además de alguna otra cosa, las tremendamente grandes conquistas y el valor de los científicos del siglo XVII hace claramente patente que no estaban meramente utilizando los métodos antiguos, sino utilizándolos mejor. Pero si no es necesario insistir en el hecho histórico de la revolución científica del siglo XVII, tampoco puede haber dudas acerca de la existencia de un movimiento científico original en los siglos XIII y XIV. El problema consiste en la relación entre ellos. Sea lo que pudiera haber ocurrido antes, ¿debe considerarse la nueva ciencia del siglo XVII como siendo en último término un comienzo completamente nuevo, como pretendieron algunos historiadores del pasado? ¿Brotó la «nueva filosofía», la «enseñanza experimental fisico-matemática» de la antigua Royal Society sin familia anterior, de las mentes de Galileo, Harvey, Francis Bacon y Descartes? Dando por supuestas las grandes y fundamentales diferencias entre la ciencia medieval y la del siglo XVII, las notables semejanzas subyacentes, independientemente de otras evidencias, in-dican que una visión más exacta de la ciencia del siglo XVII ha de mirarla como la segunda fase de un movimiento intelectual en Occidente que comenzó cuando los filósofos del siglo XIII leyeron y asimilaron en las traducciones latinas a los grandes autores científicos de la Grecia clásica y del Islam.

Se puede preguntar, pues, ¿qué es lo que los científicos del siglo XVII conocieron acerca de la obra medieval y cómo pueden

caracterizarse las diferencias y semejanzas de sus objetivos?

Por lo que concierne a la primera pregunta, la producción de las primeras imprentas indica que las principales obras científicas medievales fueron efectivamente puestas en circulación, y esto indica a su vez que existía una demanda académica de esas obras. Los datos disponibles indican que, como se podía esperar, las primeras imprentas de finales del siglo XV y principios del XVI, por ejemplo, en Venecia y Padua, y en Basilea y París, continuaron reproduciendo por el nuevo procedimiento el mismo tipo de obras que había sido reproducido anteriormente a mano. Una gran proporción de estas obras eran científicas y consistían en ediciones de obras de autores clásicos, árabes (en traducción latina) y medievales. Una mejora considerable respecto de los antiguos manuscritos fue la publicación de *Opera Omnia* en ediciones conjuntas críticas.

Aunque hubo algunas excepciones notables, la mayor parte de las obras científicas medievales más importantes fueron disponibles gracias a la imprenta. Sin extendernos en detalles complejos, éstas incluían, entre los autores más filosóficos, las obras principales sobre el método científico y filosofía de la ciencia de Grossetesta, Alberto Magno, Tomás de Aquino, Roger Bacon, Duns Scoto, Burley, Ockham, Cusa y los averroístas italianos desde Pedro d'Abano hasta Nifo y Zabarella, a principios del siglo XVI. Las obras sobre Dinámica y Cinemática de Bradwardino, Heytesbury, Ricardo Swineshead, Buridán, Alberto de Sajonia y Marliani fueron todas ellas impresas más de una vez, e igualmente lo fueron algunas de

las obras matemáticas de Oresme, aunque no la importante *De Configurationibus Intensionum* ni *Le Livre du Ciel*. También las obras de Dumbleton continuaron en manuscrito. Sobre la Estática, el *Liber Jordani de Ponderibus* fue publicado en 1433, y el *De Ratione Ponderis* de la «escuela» de Jordano Nemorarius fue publicado por Tartaglia en 1565. Sobre Óptica, todas las obras de Grosetesta, Roger Bacon, Witelo (junto con el tratado de Alhazen), Pecham y Themon Judaei encontraron editor. La excepción más sobresaliente fue el *De Iride* de Teodorico de Freiberg, pero una exposición de su teoría del arco iris con los diagramas esenciales fue publicada en Erfurten 1514. La *Epístola De Magnete* de Petrus Peregrinus fue impresa dos veces en el siglo XVI, en 1558 y 1562; fue conocida y apreciada por Güberr. El texto astronómico más popular era la *Esfera* de Sacrobosco, pero también se imprimieron en cantidades representativas tablas astronómicas y obras matemáticas como las de Juan de Murs, Peurbach y Regiomontano. Se imprimió el *Tratado del astrolabio* de Chaucer, pero no los manuscritos de Ricardo de Wallingford. Otro matemático importante cuyas obras no vieron la luz fue Leonardo Fibonacci.

El biólogo medieval más importante fue Alberto Magno; su *De Animalibus* fue impreso, y también lo fueron sus obras geológicas y químicas. Entre otras obras de Biología impresas se encontraban el *Arte de cetrería* de Federico II, y las obras de Tomás de Cantimpré, Pedro de Crescenzi y Conrado de Megenburc. Los herbarios de Rufino y Rinio no fueron impresos, pero se imprimieron otras obras de este tema, en particular las *Pandectas* de Mateo Sylvaticus, y

también se publicaron impresos nuevos herbarios en latín y en romance (*vide infra* pp. 233 y ss.). La obra de Historia Natural más popular era *Sobre las propiedades de las cosas* de Bartolomé Anglico. Se imprimieron muchas veces los tratados de Anatomía, Cirugía y Medicina, por ejemplo, de Mondino, Guy de Chauliac, Arnáu de Vilanova, Gentile da Foligno y Juan de Gaddesden, en algunos casos en varias lenguas. En este campo, algunas otras obras excelentes, como las de Enrique de Mondeville y Tomás de Sarepta, no fueron impresas. Se imprimieron, sobre Química y Alquimia, las obras de Arnáu de Vilanova y las atribuidas a Ramón Lull. Igualmente, lo fueron un cierto número de tratados prácticos sobre varios temas, los de Brunschwig, Agrícola y Biringuccio, que incluían gran parte de la práctica química antigua.

El grado en que los científicos de la época mostraban interés por los tratados medievales variaba según los distintos individuos. En el siglo XVI, las fuertes inclinaciones clásicas de hombres como Copérnico y Vesalio quizá les impidieron prestar mucha atención a los autores medievales, pero otros científicos de talla lo hicieron ciertamente. Por ejemplo, los anatomistas italianos Achillini y Berengario da Carpí escribieron comentarios a la anatomía de Mondino (*vide infra* p. 241). La teoría del *Impetus* y otros aspectos de la dinámica, cinemática y estática medievales fueron estudiados y enseñados por matemáticos y filósofos como Tartaglia, Cardano, Benedetti, Bonamico y el mismo Galileo en su época de juventud. En Inglaterra, el doctor John Dee coleccionó manuscritos, especialmente de las obras matemáticas y físicas de Grossetesta,

Roger Bacon, Pecham, Bradwardino y Ricardo de Wallingford, mientras Robert Recordé recomendaba las obras de Grosetesta y otros autores de Oxford a los estudiantes de Astronomía. Dee y Recordé, junto con Tomás y Leonardo Digges, fueron defensores precoces de la teoría copernicana, y todos ellos consideraron su trabajo como un renacimiento de los grandes días de Oxford de los siglos XIII y XIV. Leonardo Digges, al describir el trabajo de pionero de su padre sobre los telescopios, reconocía a Roger Bacon como una autoridad en Óptica. Leonardo da Vinci, Maurolico, Marco Antonio de Dominis, Giambattista della Porta, Johann Marcus Marci y Cristóbal Scheiner se referían todos en sus obras a Bacon, Witelo y Pecham. Kepler escribió un comentario sobre Witelo, corrigiendo sus tablas de ángulos de refracción; la obra de Harriot y Snell sobre la ley de la refracción parece haber estado animada por la edición de Witelo y de Alhazen por Frederick Risner en 1572; y muchos otros autores de Óptica del siglo XVII, por ejemplo, Descartes, Fermat, James Gregory, Emanuel Maignan y Grimaldi, utilizaron la misma fuente. Por lo que concierne a Descartes, citaba raras veces a quienes debía algo, pero su *Météores* sigue exactamente el mismo orden del tema que la *Meteorología* de Aristóteles y es, por más de un concepto, el último de los comentarios medievales sobre esa obra tan comentada (cf. *infra* pp. 223-227).

Se ha dicho bastante para demostrar que los principales científicos del siglo XVI y principios del XVII conocían y utilizaban las obras de sus predecesores medievales. La historia es la misma en Biología y

Química, en cuyo campo el autor medieval principal era Alberto Magno. También es igualmente visible la parte medieval de los antecesores en las concepciones del método científico y de la explicación, en particular, por ejemplo, en el empleo que hace Galileo de los métodos de «resolución y composición» para elucidar la relación entre la teoría y la experiencia y para desarrollar la forma «euclidiana» de las explicaciones científicas. También sucede lo mismo con la concepción neoplatónica de la naturaleza, como siendo en último término matemática, utilizada por primera vez en la Edad Media y en la «cosmología de la luz» de Grossetesta, y que se manifiesta en formas distintas en el pensamiento de Galileo, Kepler y Descartes. Pero ¿los científicos, en particular los del siglo XVII, aceptaron y continuaron los objetivos y métodos de los escolásticos? En el capítulo siguiente se verá con mayor detalle que hicieron mucho más. Podemos señalar una característica indicativa de una diferencia esencial.

Las doctrinas básicas de la ciencia medieval se desarrollaron casi enteramente dentro del contexto de las discusiones académicas basadas en algunas de sus etapas y, en mayor o menor grado, en las obras utilizadas en la enseñanza universitaria. Los comentarios y *quaestiones* sobre los temas tratados en esas obras podían haberse alejado mucho de los originales de Aristóteles, o Ptolomeo, o Euclides, o Alhazen, o Galeno; sin embargo, no se separaban de ellos. Es cierto que las aplicaciones de las ciencias académicas se pusieron en práctica al margen de las universidades, como en el caso de la Astronomía en la determinación del calendario y

proposiciones para su reforma, o de la Aritmética en la hacienda pública y el comercio, o de la Anatomía, Fisiología y Química en la Cirugía y Medicina. Es cierto también que en otros campos igualmente ajenos al sistema universitario, por ejemplo, en la tecnología de distintos tipos y en el Arte y la Arquitectura con su tendencia creciente hacia el realismo, se hicieron progresos que iban a ser de gran importancia para la Ciencia. Es verdad que las razones del desarrollo y crecimiento de la Ciencia dentro de las universidades, y del crecimiento y expansión del mismo sistema universitario, deben relacionarse con las razones del desarrollo de estados políticos nacionales basados en un capitalismo comercial expansivo que podía dar empleo a las personas responsables de estas actividades tecnológicas y artísticas fuera de la Universidad. Los últimos se convirtieron en los «artistas-ingenieros» de los siglos XV y XVI, y los *virtuosi* y señores independientes científicos del siglo XVII iban a tomar la dirección de la Ciencia, haciendo de ella más una actividad de la Academia dei Lincei, o de la Royal Society, o de la Académie Roy al des Sciences que de la Universidad. Esto fue cierto, aunque en estas sociedades científicas existiera un predominio de universitarios, que fueron de hecho los que iban a hacer volver la nueva ciencia al seno de las universidades.

En los siglos XIII y XIV, sin embargo, los conceptos centrales de la Ciencia fueron cultivados dentro de la estructura de la facultad universitaria de artes, cuyo programa de estudios se amplió para incluir las nuevas traducciones del griego y del árabe y algunos tratados técnicos de matemáticas aplicadas, y de las facultades

superiores de Medicina y Teología. Las personas que las cultivaban eran clérigos y maestros universitarios. El ejercicio académico nunca estuvo alejado del telón de fondo de los tratados que ellos legaron, esas obras poco literarias que forman la gran colección de manuscritos y de ediciones tempranas que nos muestran su forma de pensar. Es verdad que muchos de ellos eran pensadores originales e ingeniosos. Pero los grandes problemas científicos y cosmológicos que abordaron eran raras veces enfocados por ellos en cuanto, estrictamente científicos. El mayor problema de todos era el de la relación de la cosmología de la teología cristiana basada en la revelación y la de la cosmología de la ciencia racional dominada por la filosofía de Aristóteles. Aunque algunas de las mejores obras científicas medievales versaban sobre problemas concretos estudiados sin ninguna referencia a la Teología o a la Filosofía o incluso a la Metodología, fue dentro de una estructura de Filosofía relacionada estrechamente con la Teología, y en particular con el sistema de los estudios universitarios dirigidos por clérigos, donde tuvo lugar el desarrollo central de la ciencia medieval.

Consecuencia de esto fue que la Ciencia en la Edad Media fuera casi siempre al mismo tiempo filosofía de la Ciencia. Sin duda, las mismas características aparecerán en cualquier época que esté todavía precisando la dirección y objetivos de su investigación, como aparecieron de forma eminente en el siglo XVII, por ejemplo, en el pensamiento científico y en las controversias de Galileo, Descartes y Newton. En contraste con los científicos medievales y los del siglo XVII, los científicos del siglo XX saben, en general, cómo deben

habérselas con los problemas, el tipo de preguntas que van a plantear a la naturaleza y los métodos que emplearán para conseguir las respuestas. Solamente en los problemas más profundos y generales, cuando una línea de explicación parece haber llegado a un *impasse*, la filosofía actual necesita alterar el curso regular del núcleo de la tarea científica que se está realizando. Pero existe una diferencia básica entre los objetivos de la filosofía de la ciencia medieval y los de toda la filosofía de la ciencia desde Galileo. La última está interesada *primordialmente* en clarificar y facilitar los procesos y consiguientes progresos de la misma Ciencia. El principal interés de los científicos desde Galileo ha recaído sobre el siempre creciente ámbito de problemas concretos que la Ciencia puede resolver; y si los científicos emprenden investigaciones filosóficas, es habitualmente porque ciertos problemas científicos concretos y específicos pueden ser resueltos satisfactoriamente sólo por una reforma completa de los principios fundamentales. Los ensayos de Filosofía de Galileo y Newton tienen esencialmente este objetivo. Pero los filósofos medievales de la naturaleza estaban interesados *primordialmente* menos por los problemas concretos del mundo de la experiencia que por el *tipo de saber* de la ciencia de la naturaleza: cómo se adecuaba dentro de la estructura general de su metafísica y, si se extendía más, qué relación tenía con la Teología. Muchos problemas científicos fueron descubiertos como analogías que podían iluminar un problema teológico, como sucedió con la causalidad instrumental y la teoría del *impetus*. Sin duda, el hecho de que se plantearan por interés hacia otros problemas fue una de

las razones por las cuales, en el curso del desarrollo, fueron abandonados súbitamente con tanta frecuencia.

El contraste es, pues, de carácter general y no es, por supuesto, exclusivo^ En el siglo XVIII, Berkeley y Kant, por ejemplo, se interesaron primordialmente no por la Ciencia, sino por la relación de la cosmología newtoniana con la Metafísica, mientras que en el siglo XIII Jordano, Gerardo de Bruselas y Petrus Peregrinus parecen haber estado exentos de todo interés filosófico y haberse interesado puramente con los problemas científicos inmediatos. Pero si lo que se ha dicho caracteriza verdaderamente al ambiente intelectual general de la ciencia medieval, explica también en buena parte lo que de desconcertante y claramente aparece en una obra por otra parte excelente. Ayuda a explicar, por ejemplo, el hiato entre la repetida insistencia sobre el principio de la verificación experimental y las muchas afirmaciones generales nunca puestas a prueba por la observación; peor todavía, la satisfacción con experimentos imaginarios incorrectos o imposibles; aún peor, las cifras falsas dadas, por ejemplo, por científicos del calibre de Witelo y Teodorico de Freiberg, como resultados supuestos de medidas que evidentemente nunca realizaron. Hay, por supuesto, ejemplos de la ciencia medieval no afectados por estos defectos, pero era una peculiaridad de la época el que pudieran darse aun en el curso de las investigaciones mejor concebidas. Queda siempre la impresión de que el investigador no estaba muy interesado por los detalles de hecho y por las medidas. Ciertamente, el gran interés por la lógica y la teoría de la ciencia experimental y por las concepciones filosóficas

de la naturaleza relacionada con ella, defendida por Grossetesta hasta el umbral de los trabajos de Galileo, aparece en llamativo contraste con la relativa escasez de investigaciones experimentales efectivas. Esto se entiende si vemos a los filósofos medievales de la naturaleza no como científicos modernos frustrados, sino fundamentalmente como filósofos. Dieron una exposición de las investigaciones empíricas frecuentemente como un ejercicio de lo que podía realizarse en una rama de la filosofía distinta de las otras. Es verdad que esto tuvo como consecuencia deseable el clarificar los problemas de la ciencia de la naturaleza y de ayudar a desgajarlos de contextos ajenos de la Metafísica y de la Teología. Estaban menos interesados por lo que se encontraba efectivamente gracias al experimento.

Era una orientación de su interés que podía haber resultado fatal para la ciencia occidental. Por muy excelente que pueda haber sido gran parte de su caracterización general de la metodología de la ciencia experimental, significó que raras veces los metodólogos ponían realmente a prueba efectiva sus métodos. De ese modo, raras veces los hicieron realmente exactos o realmente adecuados. En la obra de los científicos medievales abundan experimentos no dirigidos y sencillas observaciones cotidianas. Es verdad que no existía un movimiento general que concibiera la investigación experimental como una puesta a prueba continuada de una serie de hipótesis formuladas precisa y cuantitativamente, que obligaran a la reformulación de un área completa de la teoría. Los ejemplos de investigación experimental, incluso los mejores de ellos,

permanecieron aislados, sin tener un efecto general sobre las doctrinas aceptadas de la luz o de la Cosmología. Se creía que eran suficientes para ilustrar el método, y la Metodología era un fin en sí misma. Se hubiera convertido en un callejón sin salida a no ser que Galileo y sus contemporáneos, mostrando una nueva dirección del interés, hubieran buscado los temas de los ejemplos por sí mismos. Gracias a que los tomaron en serio, prestando atención a los hechos detallados del experimento y de la medida y de las funciones matemáticas ejemplificadas en la naturaleza, los científicos del siglo XVII revolucionaron radicalmente toda la estructura teórica de la Física y la Cosmología, mientras que los filósofos medievales de la naturaleza habían revisado solamente algunas secciones parciales. Si bien es verdad que un cambio fundamental en los intereses de los científicos y en la concepción de la Ciencia puede detectarse en la época de Galileo, un detalle ulterior puede indicar otro aspecto de la línea general del cambio. Quizá el rasgo más vigoroso de la filosofía de la ciencia medieval que continuó influyendo fuertemente a principios del siglo XVII fuera la concepción neoplatónica de que la naturaleza debía ser explicada en último término por medio de la Matemática. En la Edad Media, esta creencia fue aprovechada principalmente en el campo de la Óptica. Dentro del ambiente del platonismo, y animados por la historia del *Génesis* del primer día de la creación, pensadores importantes de los siglos XIII y XIV centraron su atención en el estudio de la luz como la clave de los misterios del mundo físico, y fue en la Óptica donde realizaron lo mejor de su obra científica. Pero, como en la clasificación

aristotélica, la Óptica continuó siendo, junto con la Astronomía y la Música, uno de los *media mathematica*, ciencias matemáticas aplicadas al mundo físico, distintas por una parte de la matemática pura y por otra de la Física como ciencia de las «naturalezas» y las causas.

Los científicos medievales parece que no sintieron un deseo o necesidad irresistible de prescindir de estas distinciones filosóficas. La física matemática nunca se convirtió realmente en una ciencia universal que hiciera innecesaria la física aristotélica.

Quizá pueda argüirse que Descartes, el más medieval de los grandes científicos del siglo XVII, en el sentido de ser el más influido por una filosofía de la naturaleza, llamó a su obra de Cosmología *Le Monde, ou Traité de la lumière*. Pero la física de Descartes no se basaba en una teoría de la luz; más bien, su teoría de la luz se basaba en su concepción del movimiento. Fue en el estudio del movimiento, y no en el de la luz, donde los científicos del siglo XVII buscaron la clave de la Física. Fue allí también, para su satisfacción, donde la encontraron.

Ciertamente, los físicos del siglo XVII hicieron una elección afortunada al conceder una importancia especial al estudio del movimiento en cuanto distinto de otros aspectos de la naturaleza. Pero Aristóteles y los aristotélicos medievales habían ya hecho del estudio del movimiento la base de su física. La elección por los científicos del siglo XVII no fue fortuita, ni lo fue el éxito con que se vio coronada. Al tomar el fenómeno empírico del movimiento seriamente como un problema y al buscar la solución hasta el fin,

no tuvieron otra alternativa que reformar la Cosmología en su totalidad, inventar nuevas técnicas matemáticas en ese proceso y suministrar este ejemplo eminente a los métodos de la Ciencia en su conjunto. Podemos sugerir que éste fue el progreso realizado por los *virtuosi* seculares del siglo XVII sobre los clérigos de las universidades medievales a los que tanto debían por otros conceptos.

Capítulo 2

La revolución del pensamiento científico en los siglos XVI y XVII

Contenido:

- 2.1. La aplicación de los métodos matemáticos a la mecánica*
- 2.2. La Astronomía y la nueva Mecánica*
- 2.3. La Fisiología y el método de experimentación y medida*
- 2.4. La extensión de los métodos matemáticos a los instrumentos y máquinas*
- 2.5. Química*
- 2.6. Botánica*
- 2.7. Anatomía y morfología y embriología animales comparadas*
- 2.8. Filosofía de la Ciencia y concepto de la Naturaleza en la revolución científica*

2.1. La aplicación de los métodos matemáticos a la mecánica

Es más fácil de entender cómo se produjo la revolución científica de los siglos XVI y XVII que entender la razón de que se produjera. En lo que concierne a la historia interna de la ciencia, se produjo gracias a personas que planteaban preguntas dentro del ámbito de una respuesta experimental, limitando sus investigaciones a los problemas físicos más que a los metafísicos, concentrando su atención en la observación cuidadosa de las especies de cosas que existen en el mundo de la naturaleza y de la correlación del comportamiento de una respecto de otra más que en sus

naturalezas intrínsecas, en las causas próximas más que en las formas sustanciales, y en especial en los aspectos del mundo físico que podían ser expresados en términos matemáticos. Estas características, que podían ser pesadas y medidas, podían compararse y expresarse como una longitud o un número y representarse de ese modo en un sistema disponible de Geometría, Aritmética o Algebra, en el que se podían deducir las consecuencias revelando nuevas relaciones entre acontecimientos que podían ser verificados luego por la observación. Los otros aspectos de la materia fueron ignorados.

El empleo sistemático del método experimental por medio del cual podían ser estudiados los fenómenos en condiciones simplificadas y controladas, y de la abstracción matemática que hacía posible nuevas clasificaciones de la experiencia y el descubrimiento de nuevas leyes causales, aceleraron enormemente el ritmo del progreso científico. Un hecho sobresaliente de la revolución científica es que sus etapas iniciales y en cierto sentido las más importantes fueron realizadas antes de la invención de nuevos instrumentos de medida, el telescopio y el microscopio, el termómetro y el reloj de precisión, que iban a ser después indispensables para conseguir respuestas precisas y satisfactorias a las preguntas que iban a ponerse en la avanzadilla de la Ciencia. De hecho la revolución científica, en sus etapas iniciales, se produjo más por un cambio sistemático de la concepción intelectual, por el tipo de preguntas planteadas, que por un progreso en los medios técnicos. El porqué de esta revolución en los métodos de

pensamiento es algo que permanece oscuro. No era simplemente la continuación de la creciente atención prestada a la observación y a los métodos experimentales y matemáticos que había existido desde el siglo XIII, porque el cambio cobró, en todos los aspectos, una rapidez y una cualidad que le hizo dominar el pensamiento europeo. No es una explicación satisfactoria decir que el nuevo enfoque era meramente el resultado de la obra realizada en la lógica inductiva y en la filosofía matemática por los filósofos escolásticos hasta el siglo XVI o el resultado de un renacimiento del platonismo en el siglo XV. No puede ser atribuida simplemente al efecto del renovado interés por algunos textos científicos griegos poco conocidos hasta entonces, como las obras de Arquímedes, aunque éstas estimularon ciertamente el pensamiento matemático.

Es cierto que varios aspectos de las condiciones sociales y económicas de los siglos XVI y XVII proporcionaron motivos y oportunidades que podían estimular la Ciencia. Al comienzo del siglo XVI algunos sabios eminentes mostraron un vigoroso interés por el estudio de los procesos técnicos de fabricación, lo cual ayudó a conjuntar la mente de los filósofos con la habilidad manual del artesano. Luis Vives escribía en 1531 en su *De Tradendis Disciplinis*, defendiendo el estudio serio de artes como la cocina, la construcción, la navegación, la agricultura y la sastrería, y urgía en particular a los científicos a no despreciar a los obreros manuales o avergonzarse de pedirles que les explicaran los misterios de su especialidad. Rabelais, dos años más tarde, sugería que una rama de estudio adecuada para un joven príncipe era aprender cómo eran

fabricados los objetos que utilizaba en la vida ordinaria. Rabelais describió cómo Gargantúa y su tutor visitaban a los orífices y joyeros, a los relojeros alquimistas, monederos y muchos otros artesanos. En 1568 un libro de texto latino publicado en Frankfurt para el uso de niños de escuela parece haber estado inspirado por el mismo respeto hacia la habilidad artesanal, porque adoptó la forma de una serie de versos latinos que describían la tarea de distintos artesanos, por ejemplo, un impresor, un fabricante de papel, un estañador o un tornero. Durante el siglo XVI se realizó también un notable progreso en la publicación de tratados escritos por los expertos en varios procesos técnicos. De éstos los ejemplos más sobresalientes son el *De Re Metallica* (1556), de Georg Bauer (1490-1555), o Agricola, como él mismo se llamaba, sobre la minería y la metalurgia, y los tratados de Besson, Biringucci, Ramelli y, a principios del siglo XVII, de Zonca (cf. vol. I, pp. 161-163). Este interés por los progresos de las diferentes especialidades fue expresado con gran claridad por Francis Bacon (1561-1626), primero en 1605 en *The Advancement of Learning*, y luego, más extensamente, en el *Novum Organum*. Bacon opinaba que las técnicas o, como él las llamaba, las artes mecánicas, habían florecido precisamente porque estaban firmemente basadas en los hechos y eran modificadas a la luz de la experiencia. Por otra parte, el pensamiento científico había fracasado en progresar precisamente porque estaba divorciado de la naturaleza y se mantenía alejado del experimento práctico. En su opinión la enseñanza de los maestros había sido «telarañas de enseñanza..., de ninguna sustancia o

provecho», y la nueva ciencia humanista debía estar orientada al provecho del hombre. Descartes adoptó también la misma opinión en esta materia. En el siglo XVI varios matemáticos, como Tomás Hood (floreció en 1582-1598) y Simón Stevin (1548-1620), fueron contratados especialmente por los gobiernos para solucionar problemas de navegación o de fortificación. En la última parte del siglo XVII la misma Royal Society se interesó por los procesos técnicos de varios oficios con la esperanza de que la información recogida no solamente proporcionaría una base sólida para las especulaciones de los sabios, sino que también tendría valor práctico para los mismos mecánicos y artífices. Se elaboraron varios tratados sobre temas específicos: Evelyn escribió un *Discourse of Forest Trees and the Propagation of Timber*; Petty, sobre tintes, y Boyle, un ensayo general titulado *That the Goods of Mankind may be much increased by the Naturalist's Insight into Trades*. La historia de los oficios en Inglaterra no ha sido escrita, pero la idea era atrayente y casi un siglo después fueron publicados veinte volúmenes sobre las artes y los oficios por la Academia de las Ciencias de París.

Existen también ejemplos de este interés activo por las cuestiones técnicas por parte de los científicos que les llevó a hacer contribuciones a problemas fundamentales. El intento de calcular el ángulo con que debe ser disparado un cañón para conseguir el máximo alcance llevó a Tartaglia (hacia 1500-1557) a criticar toda la concepción aristotélica del movimiento e intentar nuevas formulaciones matemáticas, aunque el problema sólo fue resuelto por Galileo. Se dice que la experiencia de los ingenieros que

construían bombas hidráulicas influyó en los experimentos que Galileo y Torricelli realizaban sobre el barómetro, y se sabe que el rumor de que pulidores de lentes holandeses habían inventado un telescopio estimuló a Galileo a estudiar las leyes de la refracción con el fin de construir uno él mismo. Descartes escribió su *Dioptrique* (1637) explícitamente para dar una base científica a la construcción de lentes para telescopios y gafas. Galileo y Huygens, cuando hicieron sus obras fundamentales sobre el péndulo, tenían en la mente la necesidad de un reloj de precisión para determinar la longitud, la cual se hacía cada vez más imperiosa por la extensión de los viajes oceánicos.

La existencia de motivos y oportunidades, aunque pusieran de relieve problemas científicos fundamentales, no explica la revolución intelectual que hizo posible a los científicos resolver estos problemas, y todavía no ha sido escrita, de hecho, la historia de la interacción entre los motivos, oportunidades, habilidad técnica y los cambios intelectuales que dieron lugar a la revolución científica.

La revolución interna del pensamiento científico que se produjo en los siglos XVI y XVII tiene, pues, dos aspectos esenciales: el experimental y el matemático, y fueron precisamente estas dos ramas de la Ciencia que eran las más dóciles a la medida las que mostraron los progresos más espectaculares. En la Antigüedad la Matemática había sido empleada con el mayor éxito en Astronomía, Óptica y Estática, y a éstas los estudiosos medievales añadieron con menos éxito la Dinámica. Estas eran también las ramas de la Ciencia que manifestaron los mayores avances en los siglos XVI y

XVII, y, en especial, fue la aplicación con éxito de la Matemática a la Mecánica lo que cambió toda la concepción humana de la naturaleza y la que provocó la destrucción de todo el sistema de cosmología aristotélico. Solamente después que, siguiendo el ejemplo de los griegos, aplicaron con éxito sus nuevos métodos a estos problemas abstractos relativamente manejables, encontraron los científicos una posición para abordar los misterios más difíciles de la materia inerte y viva. La Química, la Fisiología y las ciencias de la electricidad y del magnetismo no pueden compararse con la mecánica newtoniana en sus logros hasta el siglo XIX (cf. *supra*, p. 18; *infra*, p. 285).

Uno de los primeros en intentar expresar la naturaleza en términos de la nueva matemática fue Leonardo da Vinci (1452-1519). Comenzó sus estudios en la ciudad platónica de Florencia y trabajó después en Milán y otras ciudades del norte de Italia donde el ideal científico era aristotélico. Casi todas sus concepciones físicas se inspiraron en autores escolásticos, como Jordano Nemorarius, Alberto de Sajorna y Marliani, pero fue capaz de desarrollar sus ideas mecánicas gracias a su nuevo conocimiento de matemáticos griegos, como Arquímedes, cuyo *Sobre el equilibrio de los planos* conoció en forma manuscrita.

Entre los matemáticos antiguos Arquímedes había sido el que con más éxito combinó las Matemáticas con la investigación experimental; por eso se convirtió en el ideal del siglo XVI. Su método consistía en seleccionar problemas definidos y delimitados, y sería más exacto decir que procedía más por la manipulación

matemática de cantidades ideales que por medidas reales. Formuló hipótesis que consideró, al modo de Euclides, o como axiomas evidentes o que podían ser verificadas por experimentos sencillos. Luego dedujo las consecuencias de ellos y, en principio, las verificó experimentalmente. Así, en la obra mencionada, comenzaba con los axiomas de que pesos iguales suspendidos a distancias iguales están en equilibrio, que pesos iguales suspendidos a distancias desiguales no están en equilibrio, sino que el que está suspendido a mayor distancia desciende, y así sucesivamente. Estos axiomas contenían el principio de la palanca o, lo que es lo mismo, del centro de gravedad, y de ellos Arquímedes dedujo numerosas consecuencias.

La mecánica de Leonardo, como la de sus predecesores, estaba basada en el axioma de Aristóteles de que la fuerza motriz es proporcional al peso del cuerpo movido y a la velocidad imprimida a él. Jordano Nemorarius y su escuela habían desarrollado este axioma para expresar el principio de la velocidad virtual o trabajo, y lo aplicaron, con la noción del movimiento estático, a la palanca y al plano inclinado. Leonardo empleó las conclusiones de esta escuela y realizó varios progresos respecto de ellas. Reconoció que el brazo efectivo (o potencial) de una balanza era la línea que, pasando por el fulcro, formaba ángulos rectos con la perpendicular que pasaba por los pesos suspendidos. Reconoció que una esfera sobre un plano inclinado se mueve hasta que alcanza un punto en el que su centro de gravedad está situado verticalmente por encima de su punto de contacto, aunque rechazó el planteamiento correcto de Jordano

sobre el equilibrio en un plano inclinado en favor de una solución incorrecta dada por Pappo. Reconoció que la velocidad de una bola que caía por un plano inclinado era uniformemente acelerada, y mostró que la velocidad de un cuerpo que cae aumentaba en la misma cantidad para una caída vertical dada, tanto si descendía vertical como oblicuamente. Reconoció también que sólo era necesario considerar el componente vertical al estimar la fuerza motriz, y que el principio del trabajo era incompatible con el movimiento perpetuo: decía que si una rueda era movida durante un tiempo por una determinada cantidad de agua y si a este agua no se le añadía más ni se le permitía una caída más alta, entonces su función era finita. También utilizó el principio del trabajo, con el de la palanca, para desarrollar su teoría de las poleas y otras aplicaciones mecánicas. En Hidrostática reconoció los principios fundamentales de que los líquidos transmiten presión y que el trabajo realizado por el motor equivale al realizado por la resistencia. En Hidrodinámica desarrolló el principio, que la escuela de Jordano había aprendido de Straton, de que con una caída determinada cuanto menor es la sección del paso, mayor es la velocidad del flujo del líquido.

La dinámica de Leonardo se basaba en la teoría del *Ímpetus*, que, según afirmaba, transportaba al cuerpo en movimiento en línea recta. Pero se adhirió (como Cardano, Tartaglia y otros italianos del siglo XVII expertos en la ciencia de la mecánica) a la opinión aristotélica de que la supuesta aceleración de un proyectil después de abandonar el proyectil se debe al aire. También aceptó la

división de Alberto de Sajonia de la trayectoria de un proyectil en tres períodos, pero reconoció que el movimiento efectivo de un cuerpo podía ser la resultante de dos o más fuerzas o velocidades diferentes. Aplicó el principio del *impetus* compuesto, junto con el de un centro de gravedad que derivó de Alberto de Sajonia y desarrolló para las figuras sólidas, a un cierto número de problemas que incluían la percusión y el vuelo de las aves.

Además de sus estudios sobre Mecánica, Leonardo utilizó también la geometría griega en un intento de mejorar la teoría de las lentes y del ojo, que había derivado de una edición de la *Perspectiva Communis* de Pecham, impresa en 1482. Realizó varios progresos, pero tuvo el defecto, como sus predecesores, de creer que la función visual residía en el cristalino en vez de en la retina y la incapacidad de no entender que una imagen invertida en la retina era compatible con la visión del mundo tal como lo vemos. Su devoción por el ideal de la medida se manifiesta en los instrumentos científicos que intentó mejorar o diseñar, como un reloj, un higrómetro semejante al de Cusa, para medir la humedad de la atmósfera, un podómetro parecido al de Herón para medir la distancia recorrida y un anemómetro para medir la fuerza del viento. Aunque no escribió ningún libro, y sus ilegibles notas escritas en espejo cubiertas con bosquejos no fueron descifradas y publicadas hasta mucho más tarde, muchas de ellas en el siglo XIX, su obra no se perdió para su posteridad inmediata. Sus manuscritos fueron copiados en el siglo XVI y sus ideas mecánicas robadas por Jerónimo Cardano (1501-1576), y puede que pasaran a Stevin y, a través de Bernardino

Baldi, a Galileo, Roberval y Descartes. El español Juan Bautista Villalpando (1552-1608) utilizó sus ideas sobre el centro de gravedad, y a partir de él fueron transmitidas al siglo XVII gracias a la amplia correspondencia científica del científico y fraile mínimo Marin Mersenne.

Los filósofos de la naturaleza que sucedieron a Leonardo desarrollaron todavía más la poderosa técnica matemática que había sido posibilitada por la recuperación e impresión de algunos textos griegos desconocidos o poco estudiados hasta entonces. La primera edición en latín de Euclides apareció en Venecia en 1482, y Francesco Maurolico (1494-1575) hizo ediciones latinas de Arquímedes, Apolonio y Diofanto, y Federigo Comandino (1509-1575), de Euclides, Pappo, Herón, Arquímedes y Aristarco.

Los primeros progresos de la técnica matemática se realizaron en el Algebra. La primera *Algebra* completa impresa, la de Lúca Pacioli (1494), contenía el problema de ecuaciones de tercer grado (las que incluyen cubos de números, v. g.: x^3), que fueron resueltas por primera vez por Tartaglia (cuyo auténtico nombre era Nicolo Fontana de Brescia). Su obra le fue pirateada por Cardano, que se le anticipó en la publicación (1545). El antiguo servidor y discípulo de Cardano, Ludovico Ferrari (1522-1565), resolvió por primera vez ecuaciones de cuarto grado (implicando x^4). Las limitaciones de la teoría general de los números impidió la comprensión de las ecuaciones de quinto grado (implicando x^5), hasta el siglo XIX; pero Francisco Vieta (1540-1603) presentó un método para obtener valores numéricos de las raíces de polinomios e introdujo el

principio de reducción. La teoría de las ecuaciones fue desarrollada también por el matemático inglés Tomás Harriot (1560-1621). Para los primeros algebristas las raíces negativas habían sido ininteligibles. El primero en entenderlas fue Alberto Girard (1595-1632), que extendió también el concepto de número a las cantidades «imaginarias» como $\sqrt{-1}$, que no tenían cabida en la escala numeral ordinaria que se extiende de cero al infinito en ambas direcciones positiva y negativa.

Al mismo tiempo se realizaron mejoras en el simbolismo algebraico. Vieta utilizó letras para las incógnitas y constantes como una parte esencial del Algebra. Stevin inventó el procedimiento actual para indicar las potencias e introdujo los exponentes fraccionarios. Su simbolismo fue más tarde generalizado por Descartes en la forma x^2 , x^3 , etc. Otros símbolos, como +, -, =, >, <, $\sqrt{\quad}$, etc., para representar operaciones que antes eran descritas con palabras, habían ya sido introducidos gradualmente desde el final del siglo XV, de forma que en las primeras décadas del siglo XVII el Algebra y la Aritmética estaban tipificadas en forma parecida a la actual.

Por la misma época se hicieron también dos importantes progresos en la Geometría. El primero fue la introducción de la geometría analítica; el segundo, la aparición del cálculo infinitesimal. Nicolás de Oresme había dado un paso hacia la geometría analítica, y hay razones para creer que Descartes, que no tenía el hábito de mencionar a quienes debía algo, conoció su obra. La persona quizá a la que Descartes debía más fue Pierre Fermat (1601-1665), que captó enteramente la equivalencia de las diferentes expresiones

algebraicas y la figura geométrica trazada por puntos moviéndose respecto de las coordenadas. Si sus predecesores inventaron el método, fue Descartes quien, en su *Géométrie* (1637), desarrolló por vez primera todas sus posibilidades. Rechazó la limitación dimensional del Algebra, y al hacer, por ejemplo, que los cuadrados o cubos de términos (x^2 , y^3) representaran líneas, fue capaz de expresar los problemas geométricos en forma algebraica y de emplear el Algebra para resolverlos. De esa forma los problemas del movimiento recibieron un provechoso avance cuando se pudo representar una curva mediante una ecuación (*vide* lamina 2). Descartes mostró también que todas las secciones cónicas de Apolonio estaban contenidas en algunas ecuaciones de segundo grado.

La geometría analítica de Descartes dependía de la hipótesis de que una longitud era equivalente a un número; esto no lo hubiera aceptado ningún griego. El segundo progreso matemático realizado durante los primeros años del siglo XVII dependió también de una ilogicidad pragmática semejante. Para comparar las figuras rectilíneas y las curvilíneas, Arquímedes había utilizado el «método del agotamiento». Según éste el área de una figura curvilínea puede ser determinada a partir de la de figuras rectilíneas inscritas y circunscritas, haciéndolas aproximar a la curva aumentando el número de sus lados. Kepler, para determinar las áreas elípticas, había introducido la idea de lo infinitamente pequeño en la Geometría, y Francisco Bonaventura Cavalieri (1598-1647) hizo uso de esa idea para desarrollar el método de Arquímedes en el «método

de los indivisibles». Este dependía de considerar las líneas como compuestas de un número infinito de puntos, las superficies como compuestas de líneas y los volúmenes de superficies. La magnitud relativa de dos superficies o de dos sólidos podía ser determinada entonces simplemente sumando las series de puntos o líneas. El «método de indivisibles», en contraste con la geometría analítica de Descartes, que no fue utilizado de forma general en la Física hasta el final del siglo XVII, surgió directamente a partir de problemas físicos. Más tarde fue desarrollado por Newton y Leibniz en el cálculo infinitesimal.

Aristóteles había defendido, en contra de la teoría pitagórica de Platón, que la Matemática, aunque útil para definir las relaciones entre ciertos acontecimientos, no podía expresar la «naturaleza esencial» de las cosas y procesos físicos, porque era una abstracción que excluía la consideración de las diferencias cualitativas irreductibles que, no obstante, existían. Según Aristóteles, el estudio de los cuerpos y fenómenos físicos era el objeto propio no de la Matemática, sino de la Física. Al estudiarlos, llegó a distinciones esenciales que no se limitaban a las diferencias cualitativas irreductibles percibidas por los sentidos, sino también, en el estudio de los movimientos percibidos, a las existentes entre movimientos naturales y violentos, entre gravedad y levedad y entre sustancias terrestres y celestes. Este punto de vista había sido compartido por Euclides y fue aceptado por Tartaglia en su comentario a los *Elementos*. Tartaglia dijo que el objeto específico de la Física, que era alcanzado por medio de la experiencia sensible, era distinto del

objeto de la demostración geométrica. Una partícula física, por ejemplo, era divisible hasta el infinito, pero un punto geométrico, no teniendo dimensiones, era, según decía, por definición indivisible. El objeto de la Geometría, afirmaba, era la cantidad continua, punto, línea, volumen, y sus definiciones eran puramente operacionales. La Geometría no se interesaba por lo que existe; podía estudiar propiedades físicas como el peso o el tiempo, solamente cuando habían sido traducidos a longitudes por los instrumentos de medida. Puesto que sus principios habían sido obtenidos por abstracción de las cosas materiales, las conclusiones que de ellos se obtenían podían ser aplicables a ellas. Así, la Física podía utilizar la Matemática, pero disponía de un campo propio, independiente, no matemático.

Con el creciente éxito de la Matemática en la resolución de problemas físicos concretos durante el siglo XVI, se redujo el área de esta reserva puramente física. Los geómetras prácticos del siglo XVI desarrollaron la idea de emplear medidas, para las que se requería instrumentos de creciente precisión, para determinar si lo que resultaba cierto en las demostraciones matemáticas también lo era en las cosas físicas. Por ejemplo, Tartaglia aceptó el principio aristotélico, que había llevado a la triple división de la trayectoria de un proyectil (cf. fig. 1), de que un cuerpo elemental tendría un solo movimiento en cualquier tiempo (porque si tenía dos, uno eliminaría al otro). Cuando se puso a estudiar matemáticamente el vuelo de un proyectil se dio cuenta de que éste, cuando era disparado fuera de la vertical, comenzaba a descender por la acción de la gravedad

inmediatamente después de haber abandonado el cañón. Tenía que defender, por tanto, que la gravedad no era completamente eliminada por el *Ímpetus*. Cardano (que también desarrolló las ideas de Leonardo sobre la balanza y la velocidad virtual) dio un paso más allá. Introdujo una distinción en la mecánica entre las relaciones matemáticas y las fuerzas o principios motores, el objeto propio de la «metafísica», y aceptó las formas antiguas de esas fuerzas. Rechazó absolutamente la separación arbitraria del objeto de la matemática en diferentes clases irreductibles, tales como los diferentes períodos de la trayectoria de un proyectil. Vieta adoptó la misma opinión.

El antiguo problema de los proyectiles había cobrado, de hecho, una nueva importancia en el siglo XVI cuando los tipos perfeccionados de cañón de bronce, con el alma barrenada con precisión, comenzaron a sustituir a los monstruos de hierro colado de los siglos XIV y XV, y cuando en Alemania se fabricó un arma de fuego más potente. Al mismo tiempo, se perfeccionaban las armas pequeñas, en especial los métodos de disparo, y a partir del siglo XV el viejo método de prender la pólvora aplicando una tea encendida al oído del cañón fue reemplazado por procedimientos perfeccionados. Primero vino la llave de tea que hizo posible que la tea encendida bajara al apretar un gatillo. Fue aplicada a los arcabuces, el arma corriente de la infantería después de la batalla de Pavía en 1525. Luego vino la llave de rueda que utilizaba piritas en vez de tea encendida, aunque esto era demasiado peligroso para ser muy usado. Finalmente, hacia 1635, apareció un procedimiento que

empleaba pedernal y que se convirtió en el cerrojo de pedernal utilizado por los soldados de Marlborough y Wellington. No surgieron problemas teóricos de balística del empleo de armas pequeñas, pero con las armas pesadas, ya que el alcance aumentaba con la potencia del arma, surgieron serios problemas de puntería. Tartaglia dedicó mucho tiempo a estos problemas y se le atribuye la invención del cuadrante de artillería. Más tarde Galileo, Newton y Euler hicieron más contribuciones, aunque no fue hasta la segunda mitad del siglo XIX cuando se construyeron tablas balísticas exactas sobre una base experimental.

Giovanni Battista Benedetti (1530-1590) fue otro matemático y físico del siglo XVI que realizó un examen crítico de las teorías aristotélicas y que expuso algunas de sus contradicciones, incluso como sistema de Física. Conocía las críticas que habían sido hechas en la época griega tardía a las ideas de Aristóteles sobre caída de cuerpos (*vide supra*, pp. 53 y ss.). Imaginó un grupo de cuerpos del mismo material y peso que caían uno al lado de otro, primero unidos y luego separados, y concluyó que el estar unidos no podía alterar sus velocidades. Un cuerpo que tuviera el tamaño de todo el grupo caería, por tanto, a la misma velocidad que cada uno de sus componentes. Concluyó, por tanto, que todos los cuerpos de la misma materia (o «naturaleza»), cualquiera que fuera su tamaño, caerían a la misma velocidad, aunque cometió el error de creer que las velocidades de los cuerpos del mismo volumen, pero de distinta materia, sería proporcional a sus pesos. Inspirándose en Arquímedes creyó que el peso es proporcional a la densidad relativa

en un medio dado²⁶. Empleó entonces el mismo argumento que Filopón para demostrar que la velocidad no podía ser infinita en el vacío (*vide supra*, pp. 54, 61). Benedetti defendió también que en un proyectil la gravedad natural no era eliminada completamente por el *Ímpetus* del lanzamiento, y siguió a Leonardo al defender que el *Ímpetus* engendraba movimiento solamente en línea recta, de la que podía ser desviado por una fuerza, como la fuerza «centrípeta» ejercida por una cuerda que impedía que una piedra girada en círculo saliera por la tangente.

Los físicos del siglo XVI cambiaron progresivamente de las explicaciones «físicas» cualitativas de Aristóteles a las formulaciones matemáticas de Arquímedes y al método experimental. Aunque sus enunciados no fueron siempre rigurosos, sus intuiciones fueron habitualmente acertadas. Como Arquímedes, intentaron concebir una hipótesis clara y someterla a la prueba de la experiencia. Así, Simón Stevin, comenzando con la hipótesis de que el movimiento perpetuo era imposible, llegó a una apreciación clara de los principios básicos de la hidrostática y de la estática. Respecto de la primera, concluyó (1586) que una masa dada de agua estaba en equilibrio en todas sus partes, porque si no fuera así estaría en movimiento continuo, y utilizó luego su teoría para demostrar que la presión de un líquido sobre la base del recipiente que lo contenía dependía sólo de la profundidad y era independiente de la forma y del volumen. Puntos equipotenciales eran los que estaban en la misma superficie horizontal.

Demostró también, con la misma hipótesis de la imposibilidad del

movimiento perpetuo, por qué un lazo de cuerda al que se sujetaban pesos a distancias iguales no se movería cuando era suspendido de un prisma triangular (fig. 3).

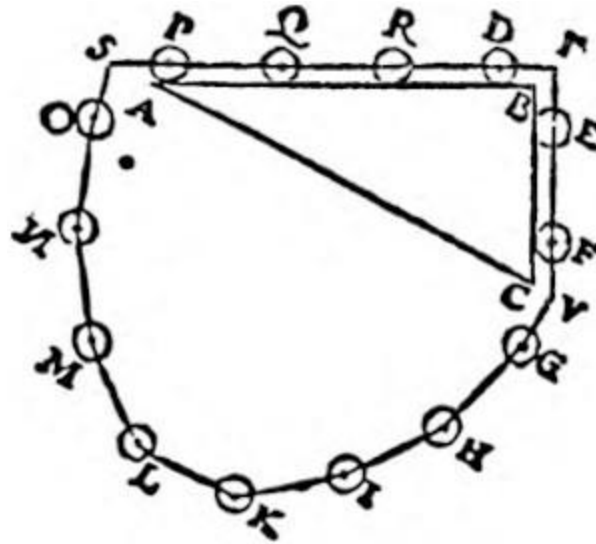


Fig. 3. La demostración de Stevin del equilibrio del plano inclinado.

De Beghinselen des Waterwichts, Leiden, 1586.

Demostó que, mientras la base del prisma fuese horizontal, no se produciría ningún movimiento en la sección superior de la cuerda cuando se quitaba la sección suspendida, y de esto llegó a la conclusión de que los pesos en un plano inclinado estaban en equilibrio cuando eran proporcionales a las longitudes de sus planos sustentadores cortados por la horizontal. De hecho, la misma conclusión había sido obtenida en el siglo XIII en el *De Ratione Ponderis*, que fue publicado en 1565 (*vide* vol. I, pp. 111-112). Esta conclusión implica la idea del triángulo o paralelogramo de fuerzas, que Stevin aplicó a máquinas más complicadas.

Un importante principio de estática que surge de la obra de Stevin,

aunque el germen provenía de Alberto de Sajonia, parece haber sido enseñado por Galileo Galilei (1564-1642). Era éste el que un conjunto de cuerpos unidos, como los de Stevin en el plano inclinado, no podrían ponerse en movimiento a menos que ese movimiento aproximara su centro común de gravedad al centro de la Tierra. El trabajo realizado sería igual entonces al producto del peso movido multiplicado por la distancia vertical. El enunciado preciso de este principio y la aplicación provechosa a la física matemática fue realizada por el discípulo de Galileo, Torricelli.

Stevin realizó el experimento, atribuido también a Galileo, de dejar caer simultáneamente dos bolas pesadas, una diez veces más pesada que la otra, desde una altura de 30 pies sobre una plancha. Las bolas golpearon a la plancha al mismo tiempo y él afirmó que esto sucedía igualmente con cuerpos de igual tamaño, pero de diferente peso, es decir, de diferente material. Experimentos similares habían sido mencionados, de hecho, en las obras de los críticos de Aristóteles desde Filopón, aunque el resultado no había sido siempre el mismo debido al efecto apreciable de la resistencia del aire sobre cuerpos más ligeros. Stevin y sus predecesores - reconocieron que sus observaciones eran incompatibles con la ley aristotélica del movimiento, según la cual la velocidad debía ser directamente proporcional a la causa motriz —en los cuerpos que caen, su peso— e inversamente proporcional a la resistencia del aire. Pero Stevin no desarrolló las consecuencias dinámicas de estas observaciones.

Fue, de hecho, Galileo el principal responsable de introducir los

métodos experimentales y matemáticos en todo el campo de la Física y de producir la revolución intelectual por la que la Dinámica primero y luego todas las ciencias iban a tomar la dirección de la que no se desviaron. La revolución de la Dinámica en el siglo XVII fue producida por la sustitución del concepto de inercia, esto es, que el movimiento rectilíneo uniforme es meramente un estado de un cuerpo y es equivalente al reposo, en vez del concepto aristotélico del movimiento como un proceso de devenir que requería para su permanencia una causa eficiente continua. El problema de la permanencia del movimiento salió a la palestra porque era esta concepción aristotélica la que subyacía a algunas de las objeciones más importantes a la teoría de Copérnico sobre la rotación de la Tierra, por ejemplo, la basada en el argumento de los cuerpos separados (*vide supra*, p. 75; *infra*, p. 1591, y la veracidad de la teoría copernicana fue quizá el principal problema científico de finales del siglo XVI y principios del XVII. Probar esta teoría fue la gran pasión de la vida científica de Galileo. Para conseguirlo Galileo intentó prescindir de la inducción ingenua a partir de la experiencia del sentido común, que era la base de la física de Aristóteles, y mirar las cosas desde un nuevo ángulo.

Esta nueva visión de hechos de la experiencia significó un cambio de perspectiva de la mayor importancia, aunque cada una de sus dos características tuvo antecedentes en una tradición anterior; la prueba de ello es que produjo fruto solucionando rápidamente muchos problemas científicos diferentes. Primero dejó de lado toda consideración de las «naturalezas esenciales» que habían sido el

tema principal de estudio de la física aristotélica y se concentró en la descripción de lo que observaba, esto es, de los fenómenos. Se ve esto en su *Diálogo sobre los dos sistemas principales del mundo* (1632), cuando, durante el Segundo Día, Salviati, que representaba a Galileo, replica de la forma siguiente a la afirmación de Simplicio, el aristotélico, de que todos saben que la causa de que los cuerpos caigan hacia abajo es la gravedad:

Te equivocas, Simplicio; debías decir que todos saben que se llama gravedad. Pero yo no te pregunto por el nombre, sino por la esencia de la cosa. De ésta tú no conoces ni un ápice más de lo que conoces sobre la esencia del motor de los astros que giran. Excluyo el nombre que se le ha atribuido y que se ha hecho familiar y corriente por las muchas experiencias que tenemos de él mil veces al día. Realmente, no comprendo cuál poder o qué principio sea el que mueve una piedra hacia abajo, ni comprendemos lo que la mueve Hacia arriba después de que ha dejado al proyector o lo que hace girar a la Luna. Meramente hemos asignado, como he dicho, al primero el nombre más específico y definido de gravedad, mientras que al segundo le asignamos el término más general de potencia impresa (virtu impressa), y al último lo llamamos una inteligencia, que o asirte o informa; y damos como causa de otros infinitos movimientos la naturaleza.

Esta actitud respecto de las llamadas causas la aprendió Galileo del nominalismo que había impregnado las escuelas averroístas del

norte de Italia durante el siglo XV. Palabras como «gravedad», afirmaba, eran meros nombres para designar ciertas regularidades observadas, y la primera tarea de la ciencia era no buscar esencias «inencontrables», sino precisar estas regularidades para descubrir las causas próximas, esto es, los fenómenos antecedentes que, cuando las otras condiciones eran las mismas, siempre y sólo ellos producían el efecto dado. «Considera lo que hay de nuevo en la romana», decía Salviati en el Segundo Día de los *Dos sistemas principales*, «y allí está necesariamente la causa del nuevo efecto». Continuaba en el Cuarto Día, enunciando lo que J. Stuart Mill iba a llamar el método de las variaciones concomitantes²⁷:

Así digo que si es verdad que un efecto puede tener solamente una causa, y si entre la causa y el efecto hay una conexión precisa y constante, entonces cuando quiera que se observe una variación precisa y constante en el efecto, debe haber una variación precisa y constante en la causa. Ahora bien, puesto que las variaciones que se realizan en las mareas en diferentes épocas del año y del mes tienen períodos precisos y constantes, deben producirse cambios regulares simultáneamente en la causa primera de las mareas. Además, las alteraciones de las mareas, en dichas épocas, consisten nada más que en cambios de sus magnitudes; esto es, en alzarse o bajar el agua en mayor o menor grado, y en su correr con mayor o menor ímpetu. Por tanto, es necesario que, sea cual sea la causa primera de las mareas, su fuerza aumente o disminuya en las épocas determinadas mencionadas... Si entonces queremos conservar

la identidad de la causa, debemos encontrar los cambios en estas adiciones y sustracciones que las hacen más o menos potentes en la producción de esos efectos que dependen de ellas.

Como indica este fragmento, todo el método de Galileo suponía la medición. Dio otra ilustración más cualitativa de esto en su sarcástica réplica en *II Saggiatore*, cuestión 45;

Si Sarsi desea que yo me crea, según el testimonio de Suidas, que los babilonios cocían los huevos volteándolos rápidamente con una honda, lo creeré; pero diré que la causa de ese efecto es muy distinta de la que ellos le atribuyen, y para descubrir la verdadera causa argumentaré de la forma siguiente; Si un efecto que ha ocurrido con otros en otro momento no ocurre con nosotros, se sigue necesariamente que en nuestro experimento faltaba algo que era la causa del éxito del intento anterior; y si sólo faltaba una cosa, esa cosa sola es la causa verdadera; ahora bien, no nos faltaban actualmente los huevos, ni la honda, ni sujetos forzados para voltearla, y, sin embargo, los huevos no quieren cocerse; y en verdad, si se calentaron, se enfriaron muy rápidamente; y puesto que nada nos falta, salvo el ser babilonios, se sigue que el hecho de ser babilonio, y no la fricción del aire, es la causa de que los huevos se cocieran, que es lo que deseo probar.

En su tarea de descubrir las causas próximas, Galileo afirmó que la

Ciencia comenzaba con observaciones y las observaciones tenían la última palabra. De acuerdo con la lógica de la ciencia final de la Edad Media, el método de «resolución y composición» demostró cómo llegar a teorías generales por el análisis de la experiencia, variando las condiciones de causas aisladas (como en la cita anterior) y verificando o refutando las teorías por el experimento. Distinguiendo el método empleado por Aristóteles para la investigación del que usaba al presentar sus conclusiones, Galileo decía en el Primer Día de los *Dos sistemas principales*:

Creo que es cierto que él obtenía, por medio de los sentidos, gracias a los experimentos y a las observaciones, tanta seguridad como es posible sobre las conclusiones y que después buscaba los medios de demostrarlas. Porque éste es el curso normal de las ciencias demostrativas; y es seguido porque, cuando la conclusión es verdadera, utilizando el método de resolución, se puede dar con alguna proposición ya demostrada o llegar a algún principio conocido per se; pero si la conclusión es falsa, uno podría proseguir sin que nunca encontrara ninguna verdad conocida —si de hecho no encuentra alguna imposibilidad o absurdo manifiesto. Y no necesitas tener ninguna duda de que Pitágoras, mucho antes de que hubiera encontrado la prueba por la que ofreció la hecatombe, estaba seguro de que el cuadrado del lado opuesto al ángulo recto en un triángulo rectángulo era igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados. La certeza de la conclusión ayuda no poco al descubrimiento de la prueba, refiriéndome siempre a las

ciencias demostrativas. Pero fuera cual fuera el método de proceder de Aristóteles, sea que el razonamiento a priori viniera antes que la percepción sensible a posteriori, sea lo contrario, es suficiente el que Aristóteles, como él dijo muchas veces, prefiriera la experiencia de los sentidos a cualquier argumento.

En el Segundo Día seguía: «Sé muy bien que un sólo experimento o una prueba concluyente de lo contrario sería suficiente para echar por tierra... una gran cantidad de argumentos probables»²⁸.

Es evidente que, en su concepción del papel del experimento, el método científico de Galileo se parecía al de los filósofos escolásticos de Oxford y Padua que habían interpretado a Aristóteles en términos de la dialéctica de Platón y que habían aplicado la *reductio ad absurdum* a las situaciones empíricas (*vide supra*, pp. 18, 42 y ss.). Galileo, al emplear los «experimentos mentales» —pero no experimentos imaginarios imposibles—, conservó prácticas antiguas. Pero realizó un avance de la mayor importancia. Insistió, al menos en principio, en la necesidad de hacer medidas sistemáticas, exactas, de forma que se pudieran descubrir las regularidades de los fenómenos cuantitativamente y pudieran ser expresadas matemáticamente.

La significación de este progreso se hace muy patente en su propio comentario a la obra de Guillermo Gilbert sobre el magnetismo (cf. *infra*, pp. 172 y ss.) en el Tercer Día de los *Dos sistemas principales*. «Voy a explicar, por cierta semejanza con el mío —decía—, su método de proceder al filosofar, para que pueda animarte a leerlo.

Sé muy bien que comprendes perfectamente cómo contribuye el conocimiento de los fenómenos a la investigación de la sustancia y esencia de las cosas; por tanto, deseo que te preocupes de informarte seriamente sobre muchos fenómenos y propiedades que se observan únicamente en la piedra imán y no en otras piedras o en otros cuerpos.» Proseguía:

Alabo enormemente, admiro y envidio a su autor, que ideó un concepto tan estupendo de un objeto que innumerables hombres de gran talento habían manejado sin prestarle atención... Pero lo que yo habría deseado de Gilbert es que hubiera sido un poco más matemático. Y, en especial, mejor formado en Geometría, una disciplina que le hubiera hecho menos dispuesto a aceptar como pruebas rigurosas esas razones que él presenta como verae causae de las conclusiones correctas que había observado. Sus razones, hablando con franqueza, no son rigurosas y carecen de la fuerza que debe incuestionablemente estar presente en las que se aduce como conclusiones científicas eternas y necesarias.

Fue por esta insistencia en la medida y en la Matemática por lo que Galileo combinó su estricto método experimental con la segunda característica principal de su nuevo enfoque de la Ciencia. Esta consistía en intentar expresar las regularidades observadas en términos de una abstracción matemática, de conceptos de los que no se necesitaba observar ejemplos, pero de los que podía deducirse la observación. La abstracción hipotética podía entonces ser puesta

a prueba cuantitativamente a partir de sus consecuencias. El método de abstracción de Galileo era explícitamente una adaptación del método hipotético de Arquímedes y Euclides. Tuvo una importancia revolucionaria tanto para su propia obra como, consiguientemente, para toda la historia de la ciencia. Por influjo de la misma tradición griega se habían utilizado esas abstracciones en algunas investigaciones científicas medievales, por ejemplo, la «balanza ideal» con brazos sin peso, las expresiones matemáticas postuladas al tratar los problemas del movimiento y los artificios geométricos postulados para «salvar las apariencias» en la astronomía. Siguiendo los precedentes de Demócrito y Platón, la matematización de la «forma» y de la «sustancia» vista especialmente en la óptica del siglo XIII es otro aspecto del método hipotético de abstracción que Galileo iba a explotar. Pero debido a la fuerza del influjo aristotélico, la mayor parte de la ciencia pregalileana se vio en la práctica constreñida por el dominio de las generalizaciones directas e ingenuas a partir de la experiencia corriente. El uso que hizo Galileo del método de la abstracción matemática le permitió establecer firmemente la técnica de investigar un fenómeno por medio de experimentos específicamente diseñados, en los que se excluían las condiciones irrelevantes de forma que el fenómeno pudiera ser estudiado en sus relaciones cuantitativas más sencillas con otros fenómenos. Sólo después de que estas relaciones habían sido establecidas y expresadas en una fórmula matemática reintroducía los factores excluidos, o llevaba su teoría a regiones que eran inmediatamente susceptibles de experimentación.

A los ojos de Galileo una de las principales ventajas del sistema era el que Copérnico había eludido el empirismo ingenuo de Aristóteles y Ptolomeo y había adoptado una actitud más sofisticada respecto de las teorías utilizadas para «salvar las apariencias». «Ni puedo admirar lo bastante la eminencia de esos hombres de talento —dice Salviati en el Tercer Día de los *Dos sistemas principales*

que han aceptado y defendido [el sistema copernicano] como verdadero, y con la vivacidad de sus juicios han hecho tal violencia a sus propios sentidos que han sido capaces de preferir lo que su razón les dictaba a lo que las experiencias sensibles les presentaba de la forma más evidente como contrario... No puedo encontrar límites para mi admiración respecto de cómo la razón era capaz, en Aristarco y Copérnico, de cometer tal violación de sus sentimientos y, a pesar de ellos, hacerse la dueña de su credulidad.

Galileo creyó que las teorías matemáticas de las que deducía las observaciones representaban la realidad permanente, la sustancia, subyacente a los fenómenos. La naturaleza era matemática. Esta idea se la debía en parte al platonismo que había estado en boga en Italia, en especial en Florencia, desde el siglo XV. Un elemento esencial de este platonismo pitagórico, que se había hecho progresivamente plausible gracias al éxito del método matemático en el siglo XVI en la Física, era la idea de que el comportamiento de las cosas estaba enteramente producido por su estructura geométrica. Durante el Segundo Día de los *DOS sistemas principales*,

Salviati responde, a la afirmación de Simplicio, que él estaba de acuerdo con Aristóteles al juzgar que Platón había amado excesivamente la Geometría. «Después de todo —dice Simplicio—, estas sutilidades matemáticas se comportan muy bien en lo abstracto, pero no funcionan cuando se aplican a la materia sensible y física.» Salviati señala que las conclusiones de las Matemáticas son las mismas exactamente en lo abstracto y en lo concreto.

Ciertamente, sería asombroso si los cálculos y razones hallados en los números abstractos no correspondieran después con las monedas de oro y plata y las mercancías concretas. ¿Sabes lo que sucede, Simplicio? De la misma forma que el calculador que quiere que sus cálculos sean sobre el azúcar, seda y lana debe descontar las cajas, embalajes y otras envolturas, así el científico (*filósofo geómetra*), cuando quiere reconocer en concreto los efectos que ha demostrado en abstracto, debe restar los obstáculos materiales; y si es capaz de hacer esto, te aseguro que las cosas no tienen menos acuerdo que los cálculos aritméticos.

La creencia que inspiró a casi toda la ciencia hasta el final del siglo XVII era que ella descubría una estructura real inteligible en la naturaleza objetiva, un *ens reale* y no meramente un *ens rationis*.

El mismo Kepler creyó que estaba descubriendo un orden matemático que proporcionaba la estructura inteligible del mundo real; Galileo, durante el Primer Día de los *Dos sistemas principales*, decía que la comprensión humana de las proposiciones matemáticas era «tan absolutamente cierta... como la misma

Naturaleza». Aunque Galileo rechazaba el tipo de «naturalezas esenciales» que habían buscado los aristotélicos, de hecho lo que hizo fue introducir otra especie por la puerta trasera. Afirmó que ya que la física matemática no podía tratar lo no-matemático, lo que no era matemático era subjetivo (*vide supra*, pp. 83 y ss.; cf. *infra*, pp. 265 y ss.). Como afirmaba en *II Saggiatore*, cuestión 6:

La Filosofía está escrita en ese vasto libro que está siempre abierto ante nuestros ojos, me refiero al universo; pero no puede ser leído hasta que hayamos aprendido el lenguaje y nos hayamos familiarizado con las letras en que está escrito. Está escrito en lenguaje matemático, y las letras son los triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las que es humanamente imposible entender una sola palabra.

Era precisamente por su actitud respecto de estas «cualidades primarias» matemáticas por lo que Galileo el platónico se distinguía del mismo Platón. Este había afirmado que el mundo físico era una copia o apariencia de un mundo ideal trascendente de formas matemáticas; era una copia inexacta y por eso la Física no era la verdad absoluta, sino, como decía en el *Timeo*, «una historia parecida». Galileo, al contrario, afirmó que el mundo físico real consistía efectivamente en entidades matemáticas y sus leyes, y que estas leyes podían ser descubiertas en detalle con absoluta certeza. En el estado de transición del pensamiento científico de su época, su análisis del método científico tenía dos objetivos principales. Por una parte quería demostrar que las explicaciones de Aristóteles no

eran explicaciones en absoluto, eran de hecho respuestas a preguntas erróneas y totalmente inadecuadas a los problemas que se estudiaba. Al eliminar la concepción propia de Aristóteles sobre las esencias reales del mundo físico, con sus diferentes cualidades naturales irreductibles, con lugares naturales en el universo y sus movimientos naturales, quería eliminar toda la oposición aristotélica a las nuevas física y dinámica matemática y a Copérnico. Por otra parte, quería demostrar cómo se encontraba la verdadera solución, las explicaciones auténticas que revelaban la esencia y la estructura reales del mundo físico, y mostrar cómo presentar razones para afirmar que esas explicaciones eran ciertamente verdaderas. Ambos propósitos eran necesarios para su programa de reformar las preguntas que debían ser planteadas con el fin de construir una ciencia matemática verdadera y universal del movimiento.

El platonismo de Galileo era, pues, del mismo tipo que el que había hecho que Arquímedes fuese conocido en el siglo XVI como el «filósofo platónico»; y con Galileo las abstracciones matemáticas obtuvieron su validez como afirmaciones acerca de la naturaleza al ser soluciones de problemas físicos particulares. Utilizando este método de abstracción a partir de la experiencia inmediata y directa, y relacionando los fenómenos observados por medio de relaciones matemáticas que en sí mismas no pueden ser observadas, llegó a experimentos sobre los que no podía haber pensado en términos del antiguo empirismo del sentido común.

Su enfoque de la investigación de las leyes matemáticas de los fenómenos, por ejemplo, de la aceleración de los cuerpos pesados, la

oscilación del péndulo, la trayectoria de una bala de cañón o los movimientos de los planetas, estaba en la línea de la forma tradicional «euclidiana» de buscar premisas, a partir de las cuales se deducían los datos de los fenómenos. Todo su modo de proceder, al construir sus teorías según el modelo euclidiano, era lo que él llamaba un *argomento ex suppositione*. Galileo fue el científico más consciente de los problemas del método y de la Filosofía. Hay muchas referencias al tema en ambas de sus dos obras principales, *Dos sistemas principales* y los *Discursos y demostraciones matemáticas sobre las dos nuevas ciencias* (1638). También describió enteramente su método en una carta a Pierre Carcavy en 1637. Puesto que era imposible tratar a la vez todas las propiedades observadas de un fenómeno, lo reducía primero intuitivamente a sus propiedades esenciales. Después de esta «resolución» de las relaciones matemáticas esenciales implicadas en un efecto dado, construía una «suposición hipotética» de la que deducía las consecuencias que debían seguirse. A esta segunda etapa la llamó «composición». Finalmente, venía un análisis experimental, al que también llamó «resolución», de los ejemplos de los efectos con el fin de poner a prueba la hipótesis comparando sus consecuencias deducidas mediante la observación. La abstracción era esencial a todo el procedimiento. Así, por ejemplo, para estudiar dinámicamente un cuerpo móvil éste se transformaba en una cantidad de materia concentrada en su centro de gravedad que atravesaba un espacio dado en un tiempo dado. Era estrictamente el «objeto físico» así abstraído y definido el que figuraba en los

teoremas dinámicos. Todas las cuestiones relacionadas con la «naturaleza» del objeto en el sentido aristotélico debían ser Ignoradas. De esta forma Galileo fue capaz de dar una formulación precisa al concepto de movimiento que fue atisbada por primera vez por Ockham y Buridán; y la significación metodológica de su distinción entre cualidades primarias y secundarias se hace patente en su estudio cinemático del movimiento en términos de velocidad.

Un buen ejemplo del método de Galileo es el de su estudio del péndulo. Eliminando los elementos secundarios de la situación, «la oposición del aire, del hilo y otros accidentes» pudo establecer la ley del péndulo: que el período de la oscilación es independiente del arco descrito y proporcional a la raíz cuadrada de la longitud (*i. e.*, isócronos) (cf. *infra*, p. 218). Pudo luego reintroducir los factores previamente excluidos. Argumentó, por ejemplo, que el motivo de que un péndulo real, cuya cuerda no carecía de peso, se detuviera, no se debía simplemente a la resistencia del aire, sino a que cada pequeña partícula de la cuerda actuaba como un pequeño péndulo, con diferente longitud y frecuencia, de forma que se inhibían unas a otras. De hecho se equivocó en esto, pero estuvo acertado en su enfoque.

Otro buen ejemplo de su método es su estudio de los cuerpos que caen libremente, uno de los fundamentos de la mecánica del siglo XVII. Rechazando la concepción aristotélica del movimiento como un proceso que requería una causa continuada, y las categorías aristotélicas del movimiento basadas en principios puramente «físicos» aceptados todavía por autores como Cardano o Kepler,

buscó una definición que le permitiera medir el movimiento. En el Primer Día de *Dos sistemas principales* decía:

Llamamos velocidades iguales cuando los espacios recorridos se encuentran en la misma proporción que los tiempos empleados en recorrerlos.

En esto siguió a autores del siglo XIV, como Heytesbury y Ricardo Swineshead, cuyas obras habían sido impresas a finales del siglo XV y enseñadas a Galileo en Pisa durante su juventud. Dispuso las cosas de modo que pudiera estudiar el problema en condiciones simples y controladas experimental mente, por ejemplo, bolas rodando por un plano inclinado. Hizo unas pocas observaciones preliminares, y analizó las relaciones matemáticas obtenidas entre dos factores únicos, espacio y tiempo, excluyendo todos los demás. Intentó luego idear lo que él llamó una «suposición hipotética», que era una hipótesis matemática de la cual podía deducir consecuencias que podían ser puestas a prueba experimentalmente; y puesto que, como decía Salviati en el Segundo Día de *Dos sistemas principales*, «la Naturaleza... no hace por muchos medios lo que puede ser hecho por pocos», adoptaba la hipótesis más sencilla posible. Durante el Tercer Día de *Dos nuevas ciencias*, «sobre el movimiento local», dio como definición del movimiento uniformemente acelerado la de un movimiento que, «cuando se aparta del reposo, adquiere durante intervalos de tiempo iguales, incrementos iguales de velocidad». Decía que adoptó esto por una razón, porque la naturaleza emplea «solamente los medios que son

más comunes, sencillos y fáciles». Su verificación experimental consistía en una serie de medidas que mostraban las variaciones concomitantes del espacio recorrido y del tiempo transcurrido. Si las consecuencias de sus hipótesis se verificaban, consideraba a esa hipótesis como una expresión verdadera del orden natural. Si no lo eran, lo intentaba de nuevo, hasta que llegaba a una hipótesis que era verificada; y entonces el caso concreto, por ejemplo, los hechos observados sobre la caída de los cuerpos, era explicado mostrando que era la consecuencia de una ley general. El objeto de la ciencia de Galileo era explicar los hechos concretos observados demostrando que eran consecuencias de leyes generales, y construir un sistema completo de esas leyes en el que las más particulares fueran consecuencias de las más generales. En todo esto era importantísimo el papel de la intuición, aun la de tipo aristotélico, aunque estuviera dirigida a un objeto diferente. La intuición intelectual, la abstracción y el análisis matemático descubrían las posibilidades hipotéticas; el experimento se hacía indispensable para eliminar las falsas hipótesis entre ellas y para identificar y verificar las verdaderas. Una hipótesis verificada de ese modo era una auténtica visión intuitiva de los detalles de la estructura real del mundo físico.

La manera de abordar los problemas físicos de Galileo aparece claramente en el *Dos nuevas ciencias*, en su deducción de las leyes cinemáticas de los cuerpos que caen libremente, cuando Salviati se aparta de la sugerencia de que ciertas causas físicas podrían explicar los hechos y se concentra en el aspecto cinemático del

problema.

El tiempo presente no parece ser el más adecuado para investigar la causa de la aceleración del movimiento natural, respecto de la cual se han expresado diferentes opiniones por distintos filósofos; algunos lo explican por la atracción natural hacia el centro; otros, por la repulsión entre las partes muy pequeñas del cuerpo, mientras otros todavía lo atribuyen a cierta tensión en el medio circundante que se cierra detrás del cuerpo que cae y lo arrastra de una posición a otra. Ahora bien, todas esas fantasías, y también otras, deben ser examinadas; pero, realmente, no vale la pena. Actualmente, el objetivo del autor es meramente investigar y demostrar algunas de las propiedades del movimiento acelerado (cualquiera que pueda ser la causa de esta aceleración); entendiéndolo por un movimiento tal que el momento de su velocidad va aumentando después de su salida del reposo en proporción simple al tiempo, que es lo mismo que decir que en intervalos iguales de tiempo el cuerpo recibe incrementos iguales de velocidad; y si hallamos que las propiedades [del movimiento acelerado], que serán demostradas más tarde, se realizan en los cuerpos que caen libremente y acelerados, podemos concluir que la definición supuesta incluye ese movimiento de los cuerpos pesados y que su velocidad va aumentando con el tiempo y la duración del movimiento.

Este fragmento, que indica un cambio de orientación clásico en la

historia de la Ciencia, fue escrito en 1638, pero Galileo no había visto siempre tan claramente que la aceleración de la caída libre debe ser definida y la definición verificada como un hecho, antes de que pudiera haber un intento de explicación dinámica.

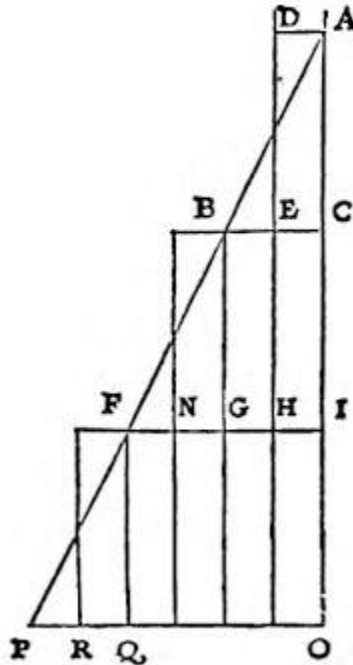


Fig. 4. Diagrama utilizado en la demostración de Galileo que con un cuerpo que cae con aceleración uniforme, en sucesivos intervalos iguales de tiempo AC, CI, IO, las distancias recorridas (medidas por las áreas ABC, CBEFI, EFHIO) aumentan como 1, 3, 5, etc. Con la terminología moderna, suponiendo $v = at$, Galileo demostró que $s = 1/2 at^2$. De Discorsi e dimostrazione metamatiche intorno á due nuove scienze, Bolonia, 1655 (1ª ed., Leyden, 1638), Tercer Día.

La clarificación que hace Galileo de esta distinción mide el progreso que él realizó entre el estudio anterior del movimiento cuando era

un joven profesor en Pisa y la comprensión más madura en Padua, a donde llegó en 1592. Ello abrió el camino de su asalto a la misma Dinámica y a su formulación, incompleta, pero definida, del concepto de movimiento de inercia. Fue la coronación de su período en Florencia, a donde volvió en 1610 bajo el patronazgo particular del Gran Duque de Toscana.

Los estudios anteriores de la caída libre no habían separado los aspectos cinéticos y dinámicos del problema. Los primeros eran siempre presentados como deducciones de los segundos y de ese modo participaban de sus imperfecciones, un rasgo que se observa incluso en la formulación correcta de Soto de la ley cinemática (*vide supra*, pp. 108 y ss.). Nadie había pensado establecer la ley cinemática simplemente independiente de la Dinámica. En sus primeros artículos científicos originales, el tratado y el diálogo titulados ambos *De Motu*, escritos en Pisa en 1590, Galileo siguió esa forma de proceder tradicional. El objetivo principal de estos ensayos de juventud era refutar la teoría dinámica y la ley del movimiento, en los que Aristóteles había fundamentado sus argumentos contra la posibilidad del movimiento en el vacío; la hipótesis fundamental era que el movimiento local era un resultado de la proporción entre la fuerza y la resistencia, para la que ambas eran necesarias (*vide supra*, p. 50 y ss.). Galileo criticó la dinámica de Aristóteles, y en particular sus explicaciones del movimiento de los proyectiles y de la caída libre, semejantes a las críticas hechas por Buridán y Alberto de Sajonia y sus seguidores, pero las explicaciones que ofreció a cambio sugieren una adhesión más bien

a la dinámica de Avempace que a la de Buridán y a la concepción de la gravedad relativa pitagórica o platónica. Afirmaba que una fuerza constante podía producir una velocidad finita uniforme a través del espacio extenso incluso sin ninguna resistencia, como, por ejemplo, en el vacío; si había un medio resistente reduciría simplemente esta velocidad finita en una cantidad definida. El movimiento del proyectil sería así posible en el vacío; lo explicó por medio de la teoría de la *virtus impressa*. Respecto de la caída libre, decía que cada especie de cuerpo tenía una velocidad de caída finita natural determinada por su «naturaleza» intrínseca o gravedad específica, una velocidad que se daría en el vacío, donde no había resistencia. En un medio resistente esta velocidad sería reducida en un grado finito determinado por las gravedades específicas del cuerpo y del medio; de hecho, si esta última era mayor, el cuerpo se elevaría. Esto dejaba todavía el problema de por qué los cuerpos pesados aceleraban cuando dejaban el estado de reposo y caían. Para explicarlo Galileo supuso que en ambos casos, el de un cuerpo lanzado hacia arriba y el de uno en reposo en su lugar natural, se adquiriría una *virtus* prolongada dirigida hacia arriba por el desplazamiento del centro; a medida que el cuerpo caía, esta *virtus* era reducida gradualmente de forma que el cuerpo aceleraba hacia abajo hasta que la *virtus* opuesta había desaparecido enteramente, después de lo cual el cuerpo continuaba cayendo con una velocidad constante propia a su gravedad. En esa época, pues, Galileo no estaba de acuerdo con sus predecesores, como Oresme, que defendía que la aceleración de la caída libre continuaría

indefinidamente, sino que más bien había hallado independientemente una teoría propuesta en la Antigüedad por Hipparco.

El estudio físico-causal del movimiento en estos ensayos de Pisa muestra que Galileo estaba todavía muy lejos del enfoque cinemático porque carecía del concepto necesario de inercia. Mientras que criticaba a Aristóteles, siguiendo en cierto modo líneas tradicionales, aceptó plenamente las hipótesis fundamentales de que una velocidad acelerada exigía un aumento correspondiente en la fuerza motriz. Otro ejemplo del mismo rasgo puede observarse en su exposición de sus ensayos de experimentos de dejar caer pesos diferentes de «una torre alta». Más tarde éstos fueron asociados por el discípulo y biógrafo de Galileo, Vincenzo Viviana, con la torre inclinada de Pisa, pero no hay pruebas evidentes de que hiciera realmente algún experimento desde la torre inclinada, y su manera de introducirlos sugiere más bien que eran «experimentos mentales». Pues al criticar la hipótesis de Aristóteles de que la velocidad de caída es proporcional al peso, habla no sólo de arrojar dos piedras, una dos veces más pesada que la otra, desde una torre alta, sino también de arrojar dos esferas de plomo, una cien veces mayor que la otra, desde la Luna. Ridiculiza la noción de que una piedra caería dos veces más aprisa que la otra y una esfera de plomo caería cien veces más rápida que la otra. De hecho, el argumento básico de Galileo para demostrar que los cuerpos de la misma materia, pero de distinto tamaño, caerían con la misma rapidez era exactamente el mismo que el utilizado por Benedetti: el

todo no puede caer más aprisa que la parte (*vide supra*, p. 142). Pero esto no se aplica a los cuerpos, como un trozo de plomo y un trozo de madera, de materia distinta. Estos caían con velocidades propias a sus «naturalezas», y escribía en el tratado *De Motu*, «si se dejan caer desde una torre alta, el plomo precede a la madera en un largo trecho; y he hecho con frecuencia pruebas de esto... ¡Oh cuán rápidamente se extraen demostraciones verdaderas de los principios verdaderos!», exclamaba.

Otros dos científicos italianos, Giorgio Coresio en 1612 y Vincenzo Renieri en 1641, realizaron efectivamente esos experimentos desde la torre inclinada, y vieron que incluso con cuerpos de la misma materia los más pesados llegaban antes al suelo, si eran dejados caer de una altura suficiente. Coresio afirmó incluso que la velocidad era proporcional al peso, confirmando así la «ley» de Aristóteles; pero Renieri, dando cifras reales, demostró lo contrario. De hecho sometió sus resultados a Galileo, quien le remitió a su *Diálogo*. Al estudiar más ampliamente el tema de sus *Dos ciencias nuevas*, Galileo había señalado que la diferencia efectiva en la velocidad observada en esos experimentos era muy diferente de la esperada según la «ley» aristotélica. Fue también consciente de que los resultados no concordaban con las expectativas de su nueva dinámica: en esa época, habiendo abandonado la concepción de las «naturalezas» como causas del movimiento, había llegado a suponer que todos los cuerpos de cualquier materia caerían a la misma velocidad. No impresionado por el desacuerdo del experimento con la teoría, Galileo hizo abstracción de la realidad empírica y dijo que

la teoría se aplicaba a la caída libre en el vacío. En un medio resistente como el aire decía que un cuerpo más ligero se retrasaría más que uno pesado. ¡Los mismos resultados, explicaciones diferentes! Hace ya tiempo que ha dejado de ser posible considerar el experimento de la torre inclinada, aun suponiendo que Galileo lo hiciera, como crucial en cualquier sentido, o incluso nuevo.

La primera evidencia de que Galileo se había orientado con éxito hacia un enfoque cinemático del problema de la caída libre proviene de su famosa carta a Paolo Sarpi en 1604, en la que decía que había demostrado que los espacios recorridos por un cuerpo que cae eran uno a otro como los cuadrados de los tiempos. Por esta época debió suponer que la aceleración continuaba indefinidamente, o lo haría así si no fuera por la resistencia del aire, que, como explicaba en el *Dos nuevas ciencias*, tendía a limitar la velocidad de un cuerpo que cae a un valor máximo. Pretendió haber deducido su teorema, conocido hoy como $e = 1/2 at^2$, del axioma de que la velocidad instantánea era proporcional a la *distancia* de la caída. Utilizó en su demostración el método geométrico medieval para estudiar cualidades variables, tomando la integral, la «cantidad de velocidad» de Oresme (el área *ABC* de la fig. 4), para representar la distancia de la caída (fig. 4). Pero de hecho, como Duhem demostró, el axioma o definición de la velocidad uniforme que Galileo, por un curioso error, supuso en su razonamiento no era la fórmula imposible ya rechazada por Soto, sino que la velocidad instantánea era proporcional al *tiempo*. Ciertamente, la distinción entre las dos formulaciones no la hacían fácil la cinemática o la matemática de la

época, ambas todavía poco claras. Exactamente el mismo error fue cometido por Isaac Beeckman y Descartes.

Parece probable que Galileo había descubierto su error y formulado correctamente la ley de la aceleración y el teorema del espacio hacia 1609, aunque solamente los publicó en el *Dos sistemas principales* en 1632. Es posible que hubiera realizado ya su experimento para comprobar la ley con una bola de bronce rodando por un plano inclinado en 1604. Este experimento es descrito en *Dos nuevas ciencias* (1638), donde expone de nuevo la demostración matemática. Careciendo de un reloj de precisión, definió los intervalos iguales de tiempo como aquellos durante los cuales pesos iguales de agua salían de un recipiente por un pequeño orificio; utilizó una gran cantidad de agua comparada con la que salía por el orificio, de manera que la disminución de la altura fuera poco importante. Su experimento confirmó su definición y ley de la caída libre, y de ella dedujo otros teoremas.

Fue este famoso experimento el que, en el aspecto empírico, distinguió la exposición de Galileo de todos los intentos anteriores para tratar el problema de la caída libre, aunque es una muestra de la carencia de sistema en esta época para presentar los resultados científicos el que Galileo no registrara ninguna medida individual efectiva y diera solamente las conclusiones que él había sacado de ellas. De hecho Mersenne fracasó en conseguir los mismos resultados cuando repitió el experimento de Galileo algunos años más tarde —un indicio quizá de la confianza de Galileo en la intuición matemática y conceptual, a la que debía su éxito científico

tanto como a sus experimentos. Y fue precisamente porque llegó a percibir la ley de la aceleración y el teorema del espacio dentro de la estructura teórica engendrada por el nuevo concepto del movimiento de inercia por lo que se convirtieron en los fundamentos de la dinámica clásica y por lo que pueden ser considerados, como el mismo Galileo los consideró, como su mayor conquista.

Aunque el concepto de movimiento desarrollado en su tratado *De Motu* era fundamentalmente opuesto al principio de la inercia, hay que ver en él aplicaciones de la técnica «platónica» de la abstracción, donde ya se presiente el concepto de inercia. Por ejemplo, en su estudio de una esfera rodando por un plano horizontal infinito, un movimiento que no es ni natural ni violento y que, por tanto, puede ser producido por una fuerza infinitamente pequeña, o el de la velocidad finita constante de un cuerpo que cae en el vacío —ambos casos son abstracciones de la realidad sensible—, eliminó por implicación la necesidad de una fuerza motriz continua para mantener la velocidad constante. Más tarde en Padua, exactamente lo mismo como había ocurrido en el siglo XIV, iba a abandonar la teoría de la *virtus impressa* como explicación del movimiento del proyectil y de la aceleración natural, en favor de una nueva teoría del *impeto* o *momento*. Pero el *impeto* de Galileo pertenece a un mundo conceptual completamente distinto del *Impetus* de Buridán. En la nueva dinámica de Galileo, el *Impetus*, como fuerza motriz, se hizo redundante: la idea imprecisa de conservación del movimiento que contenía se convertía, por análisis, en afirmaciones reconocibles de la ley de la inercia (todavía incompletamente generalizada por

Galileo) y de la conservación del momento.

En el Segundo Día de los *Dos sistemas principales*, Galileo hace preguntar a Salviati:

Si no hay en el móvil, además de la inclinación natural hacia la dirección opuesta, otra cualidad (qualità) intrínseca y natural que le hace resistir al movimiento, dime, pues, una vez más: ¿No crees que la tendencia de los cuerpos pesados a moverse hacia abajo, por ejemplo, es igual a su resistencia a ser movidos hacia arriba? [A lo que Sagredo replica]: Creo que es exactamente así, y es por esta razón por lo que dos pesos iguales en una balanza se observa que permanecen quietos y en equilibrio, la pesadez de un peso que resiste es elevada por la pesadez con que el otro, empujando hacia abajo, intenta elevarlo.

Este pasaje contiene, sin analizarla, la distinción que iba a ser establecida por Isaac Newton (1642-1727) entre el peso, la fuerza que mueve un cuerpo que cae, y la masa, la resistencia intrínseca al movimiento²⁹. De hecho, estaba implicada en la hipótesis de Galileo de que en el vacío todos los cuerpos caerían con la misma aceleración, estando las diferencias de peso contrabalanceadas exactamente por las diferencias iguales de la masa (cf. vol. I, p. 108, nota 12). Era imposible que Galileo hiciera esta distinción claramente, porque para él el peso era todavía una tendencia intrínseca hacia abajo, no algo que dependía de una relación *extrínseca* con otro cuerpo atrayente, tal como había sido sugerido por Gilbert y Kepler por analogía con el magnetismo (*vide infra*, pp.

167 y ss.) e iba a ser generalizado por Newton como la teoría de la gravitación universal. Sin embargo, la teoría de que había una resistencia intrínseca (*resistenza interna*) al movimiento, igual al peso o cantidad de materia del cuerpo, dio a Galileo su definición y medida del *momento* y le permitió abordar el problema de la persistencia del movimiento de una manera que hacía inevitable el concepto de inercia.

A partir de la observación de que en una balanza un gran peso colocado a poca distancia del fulcro oscilaba en equilibrio con un peso pequeño colocado a una distancia proporcionalmente mayor del fulcro, derivó la idea de que lo que persiste en el movimiento es el producto del peso por la velocidad. A este producto lo llamó *momento* o *impeto*; y no era una causa del movimiento, como el *impetus* de Buridán, sino un efecto y una medida de él. El problema de la persistencia del movimiento era, pues, el problema de la persistencia del *impeto* o momento. En el Tercer Día de *Dos nuevas ciencias* supuso que el momento de un cuerpo dado que caía hacia abajo por un plano inclinado sin fricción era proporcional solamente a la distancia vertical e independiente de la inclinación; de ahí concluyó que un cuerpo que caía por un plano adquiriría un momento que le llevaría hacia arriba por otro plano inclinado hasta la misma altura.

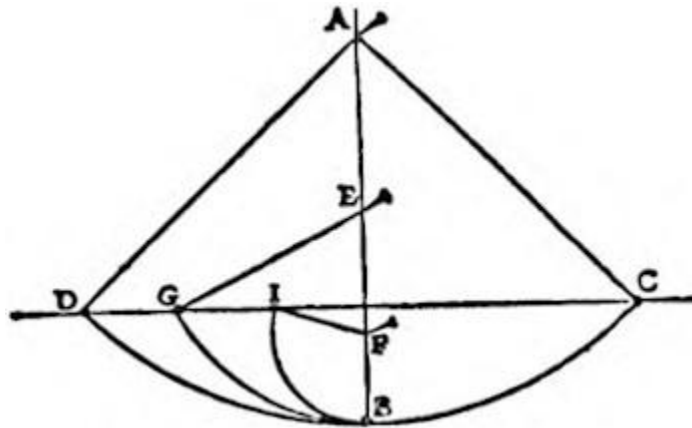


Fig. 5. Demostración de Galileo de la inercia con el péndulo. De Discorsi e dimostrazione matematiche intorno á due nuove scienze, Bologna, 1655 (1ª edición, Leyden, 1638), Tercer Día.

El disco oscilante de un péndulo era equivalente a ese cuerpo, y él demostró que si era soltado en C (fig. 5), ascendería hasta la misma línea horizontal DC si seguía el arco *BD* o, cuando la cuerda era sujeta por las agujas *E* o *F*, por los arcos más curvados *BG* o *BI*. Desarrolló estos resultados de la forma siguiente:

Podemos señalar, además, que, una vez que se ha impartido a un cuerpo móvil una velocidad cualquiera, ella será rígidamente mantenida tanto tiempo como estén suprimidas las causas externas de la aceleración o del retraso, una condición que se cumple solamente en los planos horizontales; porque en el caso de los planos inclinados hacia abajo hay ya presente una causa de la aceleración, mientras que en los planos inclinados hacia arriba hay retraso; de esto se sigue que el movimiento en un plano horizontal es perpetuo; porque si la velocidad es uniforme, ella no puede ser disminuida o debilitada, y mucho menos

destruida. Además, aunque cualquier velocidad que un cuerpo pueda haber adquirido en una caída natural se mantiene permanentemente por lo que respecta a su propia naturaleza, sin embargo, hay que recordar que si, después de descender por un plano inclinado hacia abajo, el cuerpo es desviado a un plano inclinado hacia arriba, ya hay en este último plano una causa de retraso; porque en cualquier plano, este mismo cuerpo está sujeto a una aceleración natural hacia abajo. Según esto, tenemos aquí la superposición de dos estados diferentes, a saber, la velocidad adquirida durante la caída precedente que, si actúa ella sola, llevaría al cuerpo con una velocidad uniforme hasta el infinito, y la velocidad que resulta de una aceleración natural hacia abajo, común a todos los cuerpos.

Como ya había argumentado en *Dos sistemas principales*, el movimiento perpetuo era el caso límite, que se realizaba en un mundo ideal sin fricción, en cuanto la aceleración y el retraso dado, respectivamente, por planos inclinados hacia abajo y hacia arriba tendían gradualmente a cero cuando los planos se aproximaban a la horizontal. Entonces el *impeto*, o momento, impreso al cuerpo por su movimiento persistía indefinidamente. De ese modo, el movimiento ya no era concebido como un proceso que requería una causa proporcionada al efecto, sino, como Ockham había atisbado, que era simplemente un estado del cuerpo en movimiento que persistía incambiado, a menos que sufriera la acción de una fuerza. La fuerza podía ser definida, por tanto, como lo que producía no la

velocidad, sino un *cambio* de velocidad a partir de un estado de reposo o de movimiento uniforme. Además, cuando un cuerpo sufría la acción de dos fuerzas, cada una era independiente de la otra. Galileo supuso por motivos prácticos que el movimiento uniforme continuado en ausencia de una fuerza externa sería rectilíneo, y esto le permitió calcular teóricamente la trayectoria de un proyectil. En el Cuarto Día de *Dos nuevas ciencias* demostró que la trayectoria de un proyectil, que se movía con una velocidad horizontal constante recibida del cañón y con una aceleración constante hacia abajo, era una parábola, y que el alcance en un plano horizontal era máximo cuando el ángulo de elevación era de 45 grados. No puede haber prueba mejor que este teorema de la superioridad del teórico, capaz de prever resultados todavía no observados, respecto del puro empirista, que vería solamente los hechos ya observados. Como decía:

El conocimiento de un solo hecho adquirido por el descubrimiento de sus causas prepara a la mente para verificar y entender otros hechos sin necesidad de recurrir al experimento, precisamente como en el caso actual, donde únicamente por argumento el autor demuestra con certeza que el alcance máximo se da cuando la elevación, es de 45°. Así demuestra lo que quizá nunca ha sido observado en la experiencia, a saber, que los otros disparos que exceden o no llegan en cantidades iguales a 45° tienen alcances iguales.

Todavía más enfática era la afirmación de Salviati en el Segundo Día

de *Dos sistemas principales*: «Estoy seguro, sin observaciones, que el efecto sucederá tal como digo, porque debe suceder así.»

Ciertamente, Galileo llegó por implicación al concepto de movimiento de inercia, que fue la intuición intelectual que permitió a Newton completar la mecánica terrestre y celeste del siglo XVII; pero Galileo no enunció la ley de la inercia enteramente. Él estaba investigando las propiedades geométricas de los cuerpos en el mundo real; y en el mundo real era una observación empírica el que los cuerpos caen hacia abajo, hacia el centro de la Tierra. Así, adaptando la teoría pitagórica, consideró a la gravedad como la tendencia natural de los cuerpos a dirigirse hacia el centro del conjunto de materia en el que se encontraban, y el peso como una propiedad física innata poseída por los cuerpos; ésta era la fuente del movimiento o *impeto*. Galileo permaneció fiel toda su vida a la hipótesis básica, expresada ya en el diálogo *De Motu*, de que la gravedad era la propiedad física esencial y universal de todos los cuerpos materiales. Limitando sus investigaciones físicas a los cuerpos terrestres, podía tomar el centro de la Tierra para determinar las direcciones favorecidas del espacio, aunque el mismo espacio fuera una extensión vacía y homogénea. Las únicas propiedades «naturales» que dejó a los cuerpos eran sus pesos y su equivalente «resistencia interna» inercial al cambio en un movimiento. La «gravedad natural» era la única fuerza aue él tenía en cuenta. Fue, pues, en forma de exposición de estas hipótesis como expresó su versión de la ley de la inercia. Como describió en el Tercer Día de *Dos nuevas ciencias*:

Igualmente que un cuerpo pesado o un sistema de cuerpos no puede moverse a sí mismo hacia arriba, o apartarse del centro común hacia el que tienden todas las cosas pesadas, asimismo es imposible que cualquier cuerpo pesado asuma por sí cualquier otro movimiento que el que le lleve más cerca del centro común antedicho. Por tanto, a lo largo de una horizontal por la que entendemos una superficie, de la cual cada uno de sus puntos es equidistante de este mismo centro común, el cuerpo no tendrá ningún momento (impeto).

En el mundo real, por tanto, el «plano» a lo largo del cual el movimiento continuaría indefinidamente era una superficie esférica con su centro en el centro de la Tierra. Como decía en el Segundo Día de *Dos sistemas principales*:

Una superficie que no está inclinada ni asciende debe ser equidistante igualmente en todos sus puntos del centro... Un barco que se mueve en un mar en calma es uno de esos móviles que recorren una superficie que ni está inclinada ni asciende, y si se suprimieran todos los obstáculos externos y accidentales, estaría dispuesto entonces para moverse incesante y uniformemente por un impulso recibido de una vez. Concluyo — decía en el Primer Día— que únicamente el movimiento circular puede ser apropiado naturalmente a los cuerpos que son parte integrante del universo en cuanto constituido en el mejor de los órdenes, y que lo más que se puede decir del movimiento rectilíneo es que él es atribuido por la naturaleza a los cuerpos y

a sus partes únicamente cuando éstos están colocados fuera de su lugar natural, en un orden malo, y que, por tanto, necesitan ser repuestos en su estado natural por el camino más corto. De todo lo cual me parece que puede ser razonablemente concluido que para el mantenimiento del orden perfecto entre las partes del universo es necesario decir que los cuerpos móviles son movibles sólo circularmente; y si hay algunos que no se mueven circularmente, éstos son necesariamente inmóviles, pues no hay nada más que el reposo y el movimiento circular para conservar el orden.

Este concepto del movimiento le permitió a Galileo decir que el movimiento circular de los cuerpos celestes, una vez que lo habían adquirido, se conservaría. Además, decía que era imposible demostrar si el espacio del universo real era finito o infinito. Su universo contenía, pues, cuerpos con propiedades físicas independientes, que afectaban a sus movimientos en el espacio real. La misma línea de pensamiento puede ser constatada en la observación que hace en *Dos sistemas principales* de que una bala de cañón sin peso continuaría horizontalmente en línea recta; pero que en el mundo real, en el que los cuerpos tenían peso, el movimiento que conservaban los cuerpos era en círculo. Supuso, por razones prácticas de cálculo, como en su estudio de la trayectoria de un proyectil, que era el movimiento rectilíneo lo que se conservaba. Pero este concepto del movimiento le permitió decir que en los cuerpos celestes se conservaría el movimiento circular.

No tema que explicar sus movimientos por la atracción de la gravedad.

La revolución intelectual que había costado tantas angustias y esfuerzos al «artista toscano» y que, sin embargo, le dejó a poco trecho de reducir completamente la Física a la Matemática, hizo posible que sus seguidores tomaran la geometrización del mundo real como evidente. Cavalieri se desprendió de la gravedad en cuanto propiedad física innata, y decía que, como otras fuerzas, se debía a acción externa. Evangelista Torricelli (1608-1647) consideró la gravedad como una dimensión de los cuerpos semejante a sus propiedades geométricas. Giordano Bruno (1548-1600), continuando las discusiones escolásticas sobre la pluralidad de mundos y la infinidad del espacio, se dio cuenta de que Copérnico, al hacer plausible el tomar cualquier punto como el centro del universo, había abolido las direcciones absolutas (*vide infra*, pp. 152 y ss.). Había popularizado la idea de que el espacio era, efectivamente, infinito y, por tanto, sin direcciones naturales favorecidas. El filósofo y matemático francés Pierre Gassendi (1592-1655), cuyos predecesores del siglo XVI, contrariamente a los italianos, habían tendido algunas veces a identificar la cantidad continua de la Geometría con la extensión física, identificó el espacio del mundo real con el espacio infinito, abstracto y homogéneo de la geometría de Euclides. Había aprendido de Demócrito y Epicuro a concebir el espacio como un vacío, y de Kepler a considerar la gravedad como una fuerza externa (*vide infra*, pp. 172 y ss.). Concluyó, por tanto, en su *De Motu Impresso a*

Motore Translato, publicado en 1642, que, puesto que un cuerpo que se movía por sí mismo en el vacío no sería afectado por la gravedad, y puesto que ese espacio era indiferente a los cuerpos que contenía —contrariamente al espacio de Aristóteles y a sus vestigios en Galileo—, el cuerpo continuaría siempre en línea recta. Gassendi publicó así, por vez primera, la afirmación explícita de que el movimiento que un cuerpo tendía a conservar indefinidamente era rectilíneo y que un cambio en velocidad o dirección requería la operación de una causa externa. También él fue el primero en eliminar conscientemente la noción de *Ímpetus* como causa del movimiento. Así, con la completa geometrización de la Física, el principio del movimiento inercial se hizo evidente en sí.

A Gassendi se le anticipó en la expresión de este principio, aunque no en la publicación, René Descartes (1596-1650) en su libro *Le Monde*, empezado antes de 1633. Pero si se puede pretender que Descartes fue así el primero en haber dado expresión al principio de inercia completo, se debe subrayar una distinción fundamental y, en último término, fatal entre su método de proceder y el de Galileo. Mientras que éste había llegado a su principio de inercia incompleto como una deducción del principio de la conservación del momento apoyado por un razonamiento físico, Descartes basó todo su principio en una hipótesis enteramente metafísica del poder de Dios para conservar el movimiento. Descartes había intentado que *Le Monde* fuera un sistema de mecánica celeste basado en la teoría copernicana; pero desalentado por la condenación de Galileo en 1633 por el intento similar emprendido en *Dos sistemas principales*

(*vide infra*, pp. 180 y ss.), abandonó el proyecto, y la obra incompleta no fue publicada hasta 1664, cuando su autor había muerto ya. Resumió de nuevo las ideas mecánicas contenidas en *Le Monde* en los *Principia Philosophiae* (1644). Llevando al límite lo que Galileo había sido incapaz de hacer, la idea de que lo matemático era el único aspecto objetivo de la naturaleza, decía que la materia debe ser entendida meramente como extensión (*vide infra*, pp, 263-265). Dios, cuando creó el universo de extensión infinita, le dio también movimiento. Todas las ciencias eran reducidas así a la medida y a la matemática³⁰; y todos los cambios, al movimiento local. El movimiento, al ser algo real, no podía aumentar ni disminuir en su cantidad total, sino que únicamente podía ser transferido de un cuerpo a otro. El universo continuaba, por tanto, funcionando como una máquina, y cada cuerpo permanecía en un estado de movimiento en línea recta, la forma geométrica más sencilla en la que Dios lo había puesto en marcha, a menos que fuera afectado por una fuerza externa. Únicamente el vacío era indiferente a los cuerpos que contenía, puesto que Descartes aceptaba el principio aristotélico de que la extensión, como otros atributos, podía existir solamente por inherencia a alguna sustancia; afirmaba que el espacio no podía ser un vacío, lo que era una nada, sino que debía ser un *plenum*. En el mundo real, por tanto, sólo era posible una *tendencia* a una velocidad rectilínea continua. Para Descartes, el mundo real era meramente Geometría realizada; concibió el movimiento simplemente como una translación geométrica; el tiempo era una dimensión geométrica,

como el espacio. El gran error que resultó de este enfoque fue que Descartes fracasó completamente en comprender cómo medir la cantidad de movimiento y fracasó así en captar el concepto esencial de la conservación del movimiento. El movimiento que seguía siempre la línea recta era el desplazamiento instantáneo, concebido desde el punto de vista puramente cinemático, sin ninguna propiedad no geométrica de inercia.

Esta teoría dejaba a Descartes frente al problema del movimiento curvilíneo de los planetas. Habiendo rechazado la acción a distancia y todas las causas de desvío del movimiento inerte, excepto el contacto mecánico, no podía aceptar una teoría de la atracción gravitatoria. Intentó, por tanto, explicar los hechos por torbellinos en el *plenum*. Consideró que la extensión original consistía en bloques de materia, cada uno de los cuales giraba rápidamente sobre su centro. La fricción consiguiente producía entonces tres clases de materia secundaria, caracterizadas por la luminosidad (el Sol y las estrellas), la transparencia (el espacio Ínter planetario, *i. e.*, el éter) y la opacidad (la Tierra). Las partículas de estas materias no eran atómicas, sino divisibles al infinito; y sus formas geométricas explicaban sus diferentes propiedades. Todas ellas estaban en contacto, de manera que el movimiento solamente podía darse reemplazando cada una de ellas, sucesivamente, a la vecina y produciendo así un torbellino, en el que el movimiento era transmitido por presión mecánica (lámina 5). Esos torbellinos transportaban los cuerpos celestes en sus órbitas. La presión mecánica era también el medio de la propagación de influjos, como

el de la luz y el magnetismo. El *plenum*, o éter, que debía algunas de sus características a Gilbert y Kepler, estaba así investido de las propiedades físicas, entre ellas la que más tarde se llamó «masa», que no podían ser reducidas a la Geometría.

La teoría de los torbellinos muestra, desde el punto de vista empírico, el aspecto más débil de Descartes, y Newton iba a demostrar en los *Principia Mathematica* (1687) que, de hecho, no llevaría a las leyes de Kepler del movimiento planetario y que era, por tanto, refutada por la observación (cf. *infra*, pp. 179-180).

A pesar de sus grandes contribuciones a la Matemática y a las técnicas matemáticas de la Física, Descartes desarrolló su cosmología en una proporción considerable sobre líneas enteramente no matemáticas, lo que contrasta sorprendentemente con el enfoque de Galileo de los problemas físicos. Galileo, partiendo del telón de fondo de la física escolástica, consiguió sus éxitos eliminando los elementos de causalidad física del problema del movimiento; su enfoque de la Dinámica fue desde la Cinemática; y aunque su apasionado interés por la nueva astronomía le prestó un objetivo general cosmológico, su método fue intentar resolver cada problema individual por separado, para descubrir empíricamente qué leyes se manifestaban de hecho en el mundo natural, antes de afrontar la tarea de reunirlos en un todo. Aun apreciando las descripciones cinemáticas de Galileo, Descartes consideró su obra como carente de una visión de conjunto sobre la Física, y su método de abstracción defectuoso precisamente en el punto donde Galileo lo había hecho tan eficaz: el prescindir del problema de las causas

físicas. Descartes, comentando en 1638 los *Discursos sobre dos nuevas ciencias* de Galileo, publicado hacía poco, caracterizaba por contraste su propia posición, escribiendo a Mersenne:

Comenzaré esta carta con mis observaciones al libro de Galileo. Encuentro que, en general, filosofa mucho mejor que la media, porque abandona lo más completamente que puede los errores de la escuela e intenta examinar los problemas físicos por el método matemático. En esto estoy en perfecto acuerdo con él, y creo no hay absolutamente otro camino para descubrir la verdad. Pero me parece que adolece enormemente de digresiones continuas y que no se detiene a explicar todo lo que es importante para cada punto, lo que demuestra que no los ha examinado en orden y que, sin haber estudiado las primeras causas de la naturaleza, ha buscado meramente razones para ciertos efectos particulares; y de ese modo ha edificado sin un fundamento. Un mes más tarde escribía de nuevo: Respecto de lo que Galileo ha escrito sobre la balanza y la palanca, explica muy bien lo que sucede (quod ita fit), pero no por qué sucede (cur ita fit), como yo he hecho en mis Principios.

Descartes no fue el único en no aceptar que los métodos de Galileo cubrieran el ámbito completo de los problemas físicos; muchos físicos, especialmente en Francia, por ejemplo, Fermat, Mersenne y Roberval, compartían sus dudas. El hecho de que las ideas de Descartes ejercieran, en muchos aspectos, la mayor influencia individual a lo largo de la historia de la ciencia del siglo XVII se

debió precisamente a que tomó la dirección opuesta de investigar, más allá de las descripciones matemáticas, hasta el interior de las causas físicas y la naturaleza de las cosas, y de construir audazmente un sistema científico completo que abarcara desde la Psicología y Fisiología, pasando por la Química, hasta la Física y la Astronomía, escribiendo un nuevo *Timeo*. Sus ideas marcaron la línea general de pensamiento, aun de aquellos que, como Newton, eran los máximos críticos del sistema cartesiano en sus detalles. Descartes abordó la Física como un filósofo. No se debe suponer que por esta razón no apreciase la función de los experimentos o que no los hiciera él mismo; por el contrario, los realizó (cf. *infra*, pp. 214 y ss.; 225 y ss.). Pero fue por su método filosófico y por la universalidad pretendida para sus resultados más fundamentales por lo que llegó a dominar el pensamiento científico de la época y suministrar, con un gesto abarcador y audaz, por lo menos, algo comprensivo y consistente con lo que se podía estar disconforme. Descartes vio el objetivo de su método filosófico como la búsqueda, por medio del análisis racional, de los elementos más simples constitutivos del mundo, «naturalezas simples» que no podían ser reducidas a algo más simple y que no tenían, por tanto, definiciones lógicas (*vide infra*, pp. 270 y ss.). Por lo que concierne al mundo físico, los encontraba en la extensión y el movimiento. «Si no me engaño —escribía en *Le Monde*—, no sólo estas cuatro cualidades [calor, frío, humedad, sequedad], sino también todas las otras, e incluso todas las formas de los cuerpos inanimados, pueden ser explicadas, sin tener que suponer ninguna otra cosa en la materia,

sino el movimiento, el tamaño, la forma y la disposición de sus partes.» A partir de estas «naturalezas simples», y de principios puramente metafísicos, en parte relacionados con la perfección y bondad de Dios, procedía entonces a deducir las leyes que el mundo real debía seguir. Admitió que estas conclusiones podían ser erróneas en el detalle y abandonó el intento de reducir el complicado mundo observado, con sus muchas variables desconocidas, a leyes matemáticas; de ahí el carácter tremendamente cualitativo de *Le Monde* y de los *Principia Philosophiae*. Pero nunca tuvo dudas de la exactitud de sus metas generales y de las conclusiones generales.

La conclusión general más fundamental de la filosofía mecanicista de Descartes fue la de que todos los fenómenos naturales podían ser reducidos, en último término, si se analizaban suficientemente, a un solo tipo de cambio, el movimiento local; y esta conclusión se convirtió en la creencia más influyente de la ciencia del siglo XVII. Esta, y las doctrinas subsiguientes de la corpuscularidad universal y de la universalidad de la acción por contacto físico, suministró al siglo XVII un concepto nuevo de la naturaleza, en lugar de las «formas» o «naturalezas» cualitativas de Aristóteles; ellas proporcionaron a los científicos una «creencia reguladora» que determinaba la forma dada a las teorías físicas y fisiológicas. La filosofía cartesiana de la naturaleza fue el tema inmediato de la mayor parte de las controversias en las que Newton y el newtonianismo se vieron envueltos; los *Principia Mathematica* (1687), si bien perseguían las mismas metas generales que los

Principia Philosophiae, fueron escritos, en parte, como una polémica contra los detalles del sistema cartesiano y los métodos de llegar a ellos. Además, no fue solamente en la filosofía de la Ciencia donde se dejó sentir la influencia de Descartes. Christian Huygens (1629-1695) debió su despertar científico a Descartes y nunca desertó enteramente de su punto de vista; y en la concepción de la energía cinética que se encuentra oscuramente en la concepción de Leibniz de *lavis viva* y que fue enteramente desarrollada en el siglo XIX, Descartes podría pretender haber originado una contribución sustancial a la Dinámica.

La historia del cartesianismo comienza únicamente a mediados del siglo XVII y pertenece a este volumen solamente para recordarnos que la dirección del pensamiento que culminó en el método de Galileo de la abstracción y del análisis descriptivo del movimiento, fue equilibrado por otro menos dispuesto a ver la Física apartada, aun temporalmente, de la investigación de la naturaleza y de las causas de las cosas. Por lo que concierne al principio de inercia, no fue Descartes, sino Galileo, quien suministró el concepto del movimiento sobre el que Huygens, Newton y otros iban a edificar la mecánica clásica del siglo XVII. Las investigaciones de Dinámica de estos matemáticos, aunque llevaron al enunciado de un cierto número de principios independientes cuya conexión recíproca no fue en ese momento siempre claramente entendida, como la ley de la caída de los cuerpos, los conceptos de inercia, de fuerza, de masa, el paralelogramo de fuerzas y la equivalencia del trabajo y la energía, implicaban realmente un único descubrimiento

fundamental. Este era el principio, establecido experimentalmente, de que el comportamiento de los cuerpos, unos respecto de otros, se realizaba de forma que las aceleraciones estaban determinadas, la razón de las aceleraciones opuestas que producían era constante y dependía únicamente de una característica de los cuerpos mismos, que fue llamada masa. Era un hecho que podía ser conocido únicamente por la observación el que dos cuerpos geoméricamente equivalentes se moverían diferentemente cuando eran colocados en relaciones idénticas con otros mismos cuerpos. Donde Galileo se había detenido ante el mundo real y Descartes, geometrizando desde principios abstractos, ocultó esta propiedad física en los torbellinos, Newton realizó una reducción matemática exacta de la masa a partir de los datos de la experiencia. Las masas relativas de dos cuerpos eran medidas por la razón de sus aceleraciones opuestas. La fuerza podía ser entonces definida como lo que turbaba el estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo; y la fuerza entre dos cuerpos, por ejemplo, la de la gravedad, era el producto de cada masa multiplicada por su aceleración respectiva. El movimiento inercial era un límite ideal, el estado de movimiento de un cuerpo que no era afectado por otro. El problema, que había sido tan embrollado para los que cuestionaron por primera vez la ley aristotélica del movimiento —¿por qué, excluyendo la resistencia del medio, cuerpos de masas diferentes caían a tierra con la misma aceleración?—, encontró su solución en la distinción entre masa, propiedad del cuerpo que proporciona resistencia intrínseca, y peso, motivado por la fuerza externa de la

gravedad que actúa sobre el cuerpo. Las diferencias de peso podían ser consideradas como equilibradas exactamente por diferencias proporcionales de masa. Y la misma masa tenía pesos distintos según su distancia al centro de la Tierra. Cuando estos conceptos fueron generalizados por Newton, los viejos problemas de la aceleración de los cuerpos que caen libremente y el del movimiento continuo de los proyectiles fueron finalmente resueltos; y cuando los mismos principios fueron llevados una vez más al firmamento en la teoría de la gravitación universal, se realizó la aspiración de Buridán; y los movimientos de los cielos, que Kepler había descrito correctamente, fueron unidos a los fenómenos modestos en un único sistema mecánico. Esto no sólo produjo la destrucción definitiva del mundo finito, ordenado jerárquicamente de «naturalezas» irreductiblemente distintas, que había formado el cosmos aristotélico; fue una vasta iluminación de la mente. Los principios, establecidos por vez primera efectivamente por Galileo, sobre los que se edificaba la nueva mecánica parecían definitivamente justificados por sus éxitos.

2.2. La astronomía y la nueva mecánica

Aunque el sistema ptolemaico, después de su llegada a la Cristiandad occidental en el siglo XIII, había sido considerado generalmente como un mero artificio geométrico de calcular, se sentía la necesidad de un sistema astronómico que pudiera a la vez «salvar» los fenómenos y describir las trayectorias «reales» de los cuerpos celestes por el espacio. Desde el siglo XIII, la observación y

la revisión de las tablas había ido en conexión con el deseo crónico de reformar el calendario y con las demandas prácticas de la Astrología y la Navegación. Regiomontano había sido llamado a Roma para ser consultado sobre el calendario en 1475, el año antes de su muerte, y su obra fue utilizada por los navegantes oceánicos portugueses y españoles. Algunos escritores medievales, como Oresme y Nicolás de Cusa, habían sugerido alternativas al sistema geostático como una descripción del «dato» físico; y en los primeros años del siglo XVI, el italiano Celio Calcagnini (1479-1541) propuso de una forma vaga una teoría basada en la rotación de la Tierra. Su compatriota Girolamo Fracastoro (1483-1553) intentó revivir el sistema de las esferas concéntricas sin epiciclos. Fue dejado a Copérnico (1473-1543) el elaborar un sistema que podía reemplazar el de Ptolomeo como un artificio de cálculo y de representar incluso el «dato» físico, y también de «salvar» los fenómenos adicionales, como el diámetro de la Luna, que según el sistema de Ptolomeo debía sufrir variaciones mensuales de casi un ciento por ciento.

Copérnico hizo sus primeros estudios en la Universidad de Cracovia y luego en Bolonia, donde estudió leyes, pero también trabajó con el profesor de Astronomía Domenico Maria Novara (1454-1504). Más tarde marchó a Roma, a Padua, donde estudió Medicina, y a Ferrara, donde acabó Derecho. El resto de su vida permaneció en Frauenberg, una ciudad catedralicia al este de Prusia, donde realizaba las funciones de clérigo, médico y diplomado, y realizó un esquema que fue la base de una reforma del cambio del valor de la moneda. En medio de esta vida laboriosa, procedió a reformar la

Astronomía. Aquí, aunque hizo pocas observaciones, su obra fue la de un matemático. Es el mejor ejemplo de hombre que revolucionó la Ciencia mirando a los viejos hechos con nuevos ojos. Tomó sus datos principalmente del *Epitome in Almagestum* (editado en 1496) de Regiomontano y Peurbach y de la traducción latina del *Almagesto* de Gerardo de Cremona, que fue editada en Veneda en 1515. Novara, un importante platónico, le había enseñado a concebir la constitución del universo en términos de relaciones sencillas matemáticas. Inspirado por esto, se puso a realizar su propio sistema.

Marciano Capella había salvado para los siglos siguientes la teoría de Heráclides de que Mercurio y Venus, cuyas órbitas son peculiares por sus limitadas distancias angulares del Sol (los otros planetas podían ser vistos a cualquier distancia angular, o «elongación», del Sol), giraban efectivamente alrededor del Sol, mientras que el Sol, con el resto de los cuerpos celestes, giraba alrededor de la Tierra. También se atribuye a Heráclides la afirmación de que la Tierra gira diariamente alrededor de su eje. Copérnico no sólo dio a la Tierra una rotación diaria, sino que hizo que todo el sistema planetario, incluyendo la Tierra, girara alrededor de un Sol estático en su centro. Su repugnancia a publicar esta teoría, cuyo manuscrito estaba acabado en 1532, parece haber dependido en gran parte del temor de que pudiera ser considerada absurda. Había sido satirizado en el teatro cerca de Frauenberg en 1531, y su ansiedad se hubiera confirmado, ciertamente, si hubiera vivido para oír los comentarios de personalidades tan diversas como

el matemático italiano Francesco Maurolico y el revolucionario alemán Martín Lutero (1483-1546). «El loco —decía Lutero— querría echar abajo toda la ciencia de la Astronomía.» Finalmente, Copérnico esbozó un brevesumen (*Commentariolus*), que parece llegó a ser conocido por el Papa, y en 1536 el cardenal Nicolaus von Schönberg le pidió que diera a conocer su teoría al mundo científico. Georg Joachim (Rheticus), un profesor de Wittenberg (famoso por haber introducido el perfeccionamiento de hacer que las funciones trigonométricas dependieran directamente del ángulo, en vez de del arco), viajó a Frauenberg en 1539 para estudiar el manuscrito de Copérnico, y en 1540 Rheticus publicó su *Narratio Prima de Libris Revolutionum* sobre él. La obra de Copérnico era ya bien conocida cuando, habiendo sido impresa por Rheticus, apareció en Nuremberg en 1543, dedicada al Papa Pablo III con el título *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Su valor práctico se demostró cuando Erasmus Reinhold la utilizó para calcular las *Tablas Prussianas* (1551), aunque éstas padecieran de la inexactitud de los datos de Copérnico, y cuando se propuso la cifra de la longitud del año que aparecía en el *De Revolutionibus*, aunque no se usó, como base de la reforma del calendario instituida por el Papa Gregorio XIII en 1582. A pesar del precavido prefacio de Andreas Osiander, afirmando lo contrario, Copérnico consideró, ciertamente, la revolución de la Tierra como un hecho físico, y no como una mera conveniencia matemática. El *De Revolutionibus* planteaba así el problema que ocupó la mayor parte de la Física hasta Newton. La revolución copemicana se reducía a atribuir el movimiento diario

de los cuerpos celestes a la rotación de la Tierra sobre su eje y su movimiento anual a la revolución de la Tierra alrededor del Sol, y en extraer, por los antiguos artificios de los excéntricos y epiciclos, las consecuencias astronómicas de estos postulados (figura 6).

Fue postulando el movimiento anual de la Tierra como Copérnico realizó su gran avance estratégico teórico de una reforma de la Astronomía respecto de los estudios medievales y abrió el camino para el completo desarrollo matemático de un nuevo sistema. Por ejemplo, aunque Oresme hacía girar la Tierra sobre su eje, su sistema permanecía siendo geocéntrico. Había ciertas peculiaridades en las matemáticas del sistema geocéntrico que Copérnico podía haber notado: las constantes de los epiciclos y del deferente estaban invertidas entre los planetas inferiores (Mercurio y Venus) y los superiores; y el período de revolución solar aparecía en los cálculos de cada uno de los cinco planetas (*vide* fig. 6). Copérnico no ha dejado ninguna exposición detallada de los pasos por los que llegó a la concepción del sistema heliocéntrico. Describió simplemente, en el prefacio del *De Revolutionibus*, cómo se sintió impedido a imaginar una nueva forma de calcular los movimientos de las esferas porque veía que los matemáticos no se ponían de acuerdo entre ellos y utilizó diferentes artificios: esferas concéntricas, esferas excéntricas, epiciclos. Concluyó que debía haber algún error básico.

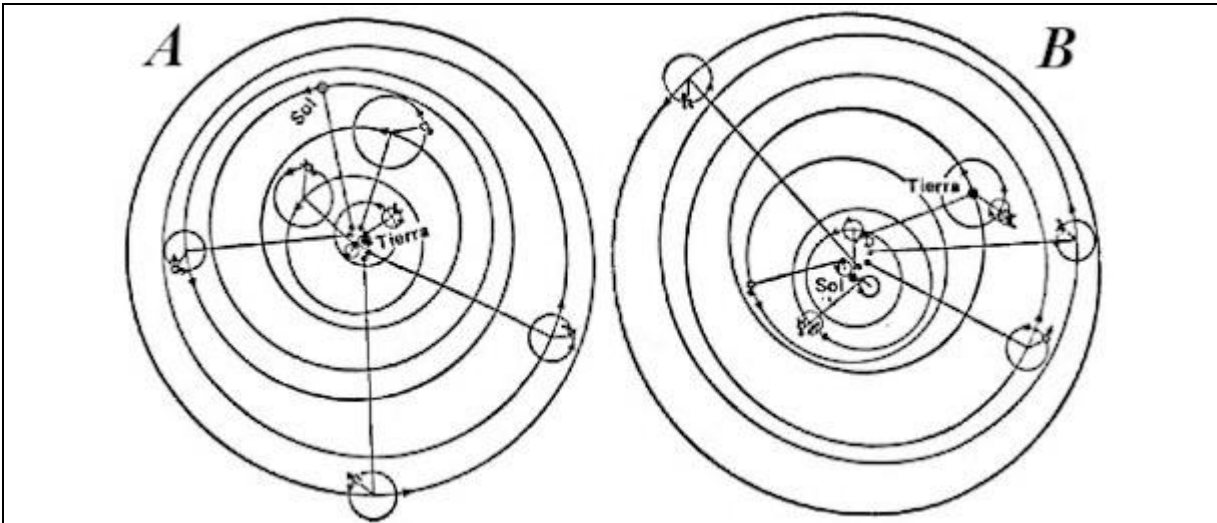


Fig. 6 (A y B). Comparación de los sistemas ptolemaico (A) y copernicano (B) (cf. vol. I, figs. 2 y 3). Aunque su sistema era esencialmente una colección de artificios independientes para cada cuerpo celeste, los períodos relativos de revolución habían establecido un orden tradicional de las órbitas que Ptolomeo aceptó. Al invertir las posiciones de la Tierra y el Sol, Copérnico pudo utilizar esos períodos para fijar las distancias relativas medias de los planetas al Sol y racionalizar la relación entre los epiciclos y deferentes de los planetas inferiores (Mercurio y Venus) y los superiores (vide el cuadro de la p. 156). El movimiento de la Tierra alrededor de su órbita en el sistema copernicano es reproducido en el sistema ptolemaico no sólo por la órbita del Sol, sino también por la deferente de cada planeta inferior (las órbitas de los planetas siendo reproducidas por los epiciclos de Ptolomeo) y por el epiciclo de cada planeta superior (aquí las órbitas de los planetas estaban reproducidas por las deferentes de Ptolomeo). No es posible mostrar estos puntos claramente en el diagrama dibujando a escala. Las posiciones de los centros de las órbitas

planetarias relativas a la del Sol en el sistema ptolemaico, y al Sol mismo en el sistema copernicano, se señalan por los puntos en los extremos interiores de los radios de las deferentes; i. e. t los círculos grandes. Copérnico consideró como su mayor logro técnico de eliminación de las objetables ecuanes ptolemaicas (cf. vol. I, p. 83), lo que consiguió refiriendo los movimientos planetarios no al Sol central, sino al centro de la órbita de la Tierra (D), que giraba él mismo alrededor del Sol siguiendo dos círculos. Este artificio introdujo inexactitudes en las latitudes planetarias, en particular en la de Marte, y fue Kepler quien en realidad hizo del Sol el punto de referencia de las órbitas planetarias (vide lámina 7). Mercurio era considerado por Ptolomeo como un caso especial, hizo que el centro de su deferente girara lentamente alrededor de otro círculo. Copérnico conservó este artificio e introdujo además la consideración única de hacer que el planeta oscilara, o «librara», sobre el diámetro de su epiciclo en vez de que se trasladara alrededor de él. Por medio de una sencilla construcción geométrica (no dada aquí) se puede mostrar que cualquier complejidad introducida en un sistema para «salvar las apariencias» puede tener su paralelo en el otro, de manera que los dos sistemas pueden hacerse equivalentes en representar el ángulo en el que aparece el planeta cuando es visto desde la Tierra. Pero los dos sistemas difieren en el alcance de sus posibilidades teóricas respecto de los planetas inferiores (Mercurio y Venus), y estas diferencias pueden suministrar una comprobación empírica para escoger entre ellos. Según el sistema copernicano, pero no según

*el ptolemaico, los planetas inferiores pueden aparecer por el lado del Sol alejado de la Tierra (no pueden hacerlo en sistema ptolemaico porque son interiores a la órbita del Sol); sus mayores distancias angulares al Sol las alcanzan cuando la Tierra-planeta-Sol forman un ángulo recto; y solamente ellos mostrarían fases completas como la Luna. Galileo confirmó estas conclusiones copernicanas con su telescopio (vide páginas 167, 184 y ss.). El sistema ptolemaico puede, sin embargo, ser adaptado para proporcionar las mismas conclusiones haciendo que los epiciclos de Mercurio y Venus giren alrededor del Sol; esa sugestión la hizo Heráclides de Ponto (vide vol. I, p. 87) y fue adoptada por Tycho Brahe para todo el sistema planetario (vide p. 166). (Diagramas vueltos a dibujar según los diagramas de William D. Stahlman en *Dialogue on the Great Systems of the World* de Galileo Galilei, traducción revisada por Giorgio Santillana, Chicago, 1953, páginas XVI-XVII.)*

(a) Sistema ptolemaico			
	Razón de los radios (correspondiente a la distancia media al Sol en el sistema coperni- cano)	Velocidad angular (grados por día)	Valor actual del movimiento medio sideral (grados por día)
Tierra	⊕	<i>Epíclios</i>	
Luna	☾		
Mercurio	☿	4,09233	4,09234
Venus	♀	1,60214	1,60213
Sol	☉	0,98563 (órbita del Sol)	0,98561 (órbita de la Tierra)
		<i>Deferente</i>	
Marte	♂	1,5206	0,52403
Júpiter	♃	5,2167	0,08309
Saturno	♄	9,2333	0,03346

(b) Sistema copernicano

	Distancia media al Sol expresada como razón de la distancia de la Tierra	Valor actual	Periodo de revolución alrededor del Sol (días)
Sol	☉	0.00257 (de la Tierra)	27,33 (alrededor de la Tierra)
Mercurio	☿	0.3871	88
Venus	♀	0.7233	225
Tierra	♁	1,0000	365,25
Marte	♂	1,5237	687
Júpiter	♃	5,2028	4,332
Saturno	♄	9,5389	10,760

Entonces cuando sopesé esta incertidumbre de los matemáticos tradicionales al ordenar los movimientos de las esferas del orbe, me defraudó el ver que una explicación más fiable del mecanismo del universo, fundado en nuestra exposición por el mejor y más regular Artífice de todos, no era establecida por los filósofos que habían investigado tan exquisitamente otros

detalles respecto del orbe. Por este motivo emprendí la tarea de releer los libros de todos los filósofos que pude conseguir, investigando si alguno había supuesto que el movimiento de las esferas del mundo era diferente al adoptado por los matemáticos universitarios.

En esta tarea llegó a las teorías griegas del doble movimiento de la Tierra, sobre su eje y alrededor del Sol, y desarrolló éstos siguiendo el ejemplo de sus predecesores, que no habían tenido escrúpulos en imaginar cuantos círculos requería el «salvar las apariencias».

Movido por esto —escribía—, comencé a pensar en un movimiento de la Tierra; y aunque la idea parecía absurda, todavía, como otros antes de mi se habían permitido el suponer ciertos círculos para explicar los movimientos de las estrellas, creí que me sería fácilmente permitido intentar si, sobre la hipótesis de algún movimiento de la Tierra, no podrían encontrarse mejores explicaciones de las revoluciones de las esferas celestes. Y así, suponiendo los movimientos que en la obra siguiente atribuyo a la Tierra, he encontrado, finalmente, después de largas y cuidadosas investigaciones, que cuando los movimientos de los otros planetas son referidos a la circulación de la Tierra y son computados para la revolución de cada estrella, no sólo los fenómenos se siguen necesariamente de eso, sino que el orden y la magnitud de las estrellas y todos sus orbes y el mismo cielo están tan conectados que en ninguna parte puede algo ser trasladado sin confusión del resto y de

todo el universo entero.

Y en el libro I, capítulo 10, continuaba:

Por tanto, no nos avergonzamos de defender que todo lo que está debajo de la Luna, con el centro de la Tierra, describe entre los otros planetas una gran órbita alrededor del Sol, que es el centro del mundo; y lo que aparece ser un movimiento del Sol es, en verdad, un movimiento de la Tierra; pero el tamaño del mundo es tan grande que la distancia de la Tierra al Sol, aunque apreciable en comparación con las órbitas de otros planetas, es como nada cuando se la compara a la esfera de las estrellas fijas. Y afirmo que es más fácil de conceder esto que dejar que la mente se vea distraída por una multitud casi interminable de círculos, que están obligados a hacer quienes detienen la Tierra en el centro del mundo. La sabiduría de la naturaleza es tal que no produce nada superfluo o inútil, sino que, frecuentemente, produce muchos efectos de una causa. Si todo esto es difícil y casi incomprensible o contra la opinión de mucha gente, lo haremos, si Dios quiere, más claro que el Sol, por lo menos a aquellos que saben algo de Matemática. El primer principio permanece, pues, indiscutido, que el tamaño de las órbitas se mide por el período de la revolución; y el orden de las esferas es entonces como sigue, comenzando por las más superiores. La primera y más alta esfera es la de las estrellas fijas, que se contiene a ella misma y todo el resto, que, por tanto, es inmóvil, siendo el lugar del universo al que se refieren el

movimiento y los lugares de todos los otros astros. Porque mientras que algunos piensan que ella también cambia algo [esto se refiere a la precesión], nosotros le asignaremos, al deducir el movimiento de la Tierra, otra causa de este fenómeno. Luego sigue el primer planeta, Saturno, que completa su circuito en treinta años; luego Júpiter, con un período de doce años; luego Marte, que gira en dos años. El cuarto lugar en el orden es el de la revolución anual, en el que hemos dicho que la Tierra está contenida con la órbita lunar como un epiciclo. En quinto lugar viene Venus, que gira en nueve meses; en sexto, Mercurio, con un período de ochenta días. Pero en medio de todo está el Sol. Porque ¿quién podría colocar, en este templo hermosísimo, esta lámpara en otro o mejor lugar que ese desde el cual puede, al mismo tiempo, iluminar el conjunto? Algunos, no inadecuadamente, le llaman la luz del mundo; otros, el alma o el gobernante. Trismegisto le llama el Dios visible, Electra de Sófocles el que todo lo ve. Así, en realidad, el Sol, sentado en el trono real, dirige la ronda de la familia de los astros.

Las consecuencias de los postulados de Copérnico fueron de dos tipos, físicas y geométricas. La rotación diaria de la Tierra encontró las objeciones físicas aristotélicas y ptolemaicas, basadas en la teoría de los movimientos naturales, relativas a los «cuerpos separados», una piedra o una flecha lanzadas al aire, y el fuerte viento del Este (*vide supra*, pp. 76 y ss.). Copérnico replicó a ellas de la misma forma que Oresme, convirtiendo el movimiento circular en

natural y diciendo que el aire compartía el de la Tierra a causa de su naturaleza común y también a causa de la fricción. Defendió que los cuerpos que caen y se elevan tenían un doble movimiento, un movimiento circular cuando estaban en su lugar natural y rectilíneo de desplazamiento de, o de vuelta a, ese lugar. La objeción a este argumento era que si los cuerpos tenían un movimiento circular natural en una dirección, ofrecerían una resistencia, análoga al peso, al movimiento en otra. La respuesta a esto, como aquélla al argumento de que la Tierra sería destrozada por lo que ahora se llama algunas veces «fuerza centrífuga», de la que Copérnico decía que sería peor para la esfera celeste si ella girara, tenía que esperar a la mecánica de Galileo.

Al movimiento anual de la Tierra en un círculo excéntrico alrededor del Sol, los críticos de Copérnico objetaban apoyándose en tres terrenos científicos. Primero, estaba en conflicto con la teoría aristotélica de los movimientos naturales, que dependía de que el centro de la Tierra estuviera en el centro del universo. A esto Copérnico replicó como Oresme y Nicolás de Cusa, aunque abandonando la teoría de Cusa del equilibrio de elementos pesados y ligeros, que la gravedad era un fenómeno local que representaba la tendencia de la materia de todo cuerpo astronómico a formar masas esféricas. La segunda objeción surgió de la ausencia de paralajes estelares anuales observables, o diferencias en la posición de las estrellas. Copérnico atribuyó esto a la enorme distancia de la esfera estelar respecto de la Tierra comparada con las dimensiones de la órbita de la Tierra. La tercera objeción continuó siendo un serio

obstáculo hasta que Galileo cambió toda la concepción del movimiento, cuando dejó de tener valor. Los aristotélicos defendían que cada cuerpo elemental tenía un solo movimiento natural, pero Copérnico dio a la Tierra tres movimientos: los dos antes mencionados que explicaban, respectivamente, la salida y la puesta de los cuerpos celestes y el paso del Sol a lo largo de la eclíptica y las retrogradaciones y estaciones de los planetas, y un tercero que estaba destinado a explicar el hecho de que el eje de la Tierra, a pesar del movimiento anual, señalaba siempre el mismo punto en la esfera celeste. Este tercer movimiento estaba destinado también a explicar la precesión de los equinoccios y sus «trepidaciones» ilusorias.

Con el Sol y la esfera celeste, límite del universo finito, en reposo, Copérnico procedió a añadir los habituales excéntricos, deferentes y epiciclos para explicar los movimientos observados de la Luna, el Sol y los planetas por medio de un movimiento circular uniforme perfecto. Neugebauer, en su *Exact Sciences in Antiquity*, comenta los aspectos matemáticos del resultado de la forma siguiente: «La creencia popular de que el sistema heliocéntrico de Copérnico constituye una importante simplificación del sistema ptolemaico es obviamente errónea. La elección del sistema de referencia no tiene ningún efecto sobre la estructura del modelo, y los modelos copernicanos requieren alrededor del doble de círculos que los modelos ptolemaicos y son mucho menos elegantes y adaptables.» Las principales contribuciones matemáticas de Copérnico, según Neugebauer, fueron tres. Clarificó los pasos de las observaciones a

los parámetros, haciendo así una mejora metodológica. Introdujo con su sistema un criterio para adjudicar distancias relativas a los planetas. Y sugirió la solución adecuada del problema de las latitudes. Pero su creencia en las trepidaciones imaginarias de los equinoccios condujo a complicaciones innecesarias y, al tomar el centro de la órbita de la Tierra como centro de todos los movimientos de los planetas, su estudio de Marte tenía errores considerables. Además, se fío de datos antiguos y falsos. Este último defecto fue remediado por Tycho Brahe (1546-1601), que demostró que las trepidaciones eran debidas únicamente a errores de las observaciones; y Juan Kepler (1571-1630), al considerar los resultados de Tycho, iba a construir su sistema de la órbita de Marte.

Copérnico había producido un sistema matemático, por lo menos, tan exacto como el de Ptolomeo, con ventajas matemáticas a la vez que desventajas. Teórica y cualitativamente, era en verdad más sencillo, porque podía dar una explicación unificada de un número de diferentes rasgos del movimiento planetario que en el sistema de Ptolomeo eran arbitrarios y sin conexión. Podía explicar las retrogradaciones y las estaciones de los planetas como meras apariencias debidas a un único movimiento de la Tierra y podía dar una explicación sencilla de varios movimientos peculiares de planetas individuales. En el siglo XVI se argüía a su favor también el que había reducido el número de círculos exigidos; utilizó 34. Copérnico había también argumentado que los movimientos postulados de la Tierra no entraban en conflicto con la Física, esto

es, con la física de Aristóteles. Estos argumentos en favor del sistema heliocéntrico eran negativos y, además, con el fin de efectuar la reconciliación, tenía que interpretar la física de Aristóteles, igualmente que había hecho Oresme, en un sentido diferente del aceptado por la mayor parte de sus contemporáneos. No es sorprendente que muchos de ellos siguieran sin dejarse convencer. ¿Cómo, pues, justificó Copérnico su innovación ante sí mismo y ante el público y por qué tuvo ella un atractivo tan vigoroso y emotivo más tarde para Kepler y Galileo? Una gran parte de la respuesta reside, ciertamente, en el neoplatonismo que todos ellos compartían. En el fragmento ya citado del *De Revolutionibus*, libro 1, capítulo 10, Copérnico justifica el nuevo sistema que propone apelando a su sencillez (cualitativa, no cuantitativa) y a la posición especial que otorga al Sol. Las biografías intelectuales de Kepler y Galileo, y la manera en que utilizaron éstos y argumentos parecidos, muestran que ellos también se habían adherido al sistema heliocéntrico, debido a sus creencias metafísicas, antes de que hubieran encontrado argumentos para justificarlo físicamente.

El sistema copernicano apelaba primero a tres clases de intereses. Las *Tablas Alfonsinas* habían causado insatisfacción porque eran antiguas y no correspondían ya a las posiciones observadas de las estrellas y planetas, y porque diferían de Ptolomeo en la precesión de los equinoccios y añadían otras esferas más allá de su novena, desviaciones ofensivas para humanistas que creían que la perfección del conocimiento se había de encontrar en las obras clásicas. Todos los astrónomos prácticos, cualesquiera que fueran

sus opiniones sobre la hipótesis de la rotación de la Tierra, se cambiaron a las *Tablas Prusianas* del siglo XVI, calculadas según el sistema de Copérnico, aunque, de hecho, eran escasamente más exactas. Algunos humanistas consideraron a Copérnico como el restaurador de la pureza clásica de Ptolomeo. Otro grupo de autores, como el físico Benedetti, Bruno y Pedro de La Ramée o, como era llamado, Petrus Ramus (1515-1572), vieron en el sistema de Copérnico un palo con el que golpear a Aristóteles. Finalmente, científicos como Tycho Brahe, Guillermo Gilbert (1540-1603), Kepler y Galileo vieron toda la significación del *De Revolutionibus* e intentaron unificar las observaciones, las descripciones geométricas y la teoría física. Fue a causa de la ausencia de esa unidad por lo que hasta el final del siglo XVI, mientras todos utilizaban las *Tablas Prusianas*, nadie hizo progresar la teoría astronómica. La contribución de Tycho Brahe fue el darse cuenta de que ese progreso exigía observaciones cuidadosas y el hacer esas observaciones.

La obra principal de Tycho fue realizada en Uraniborg, el observatorio construido para él en Dinamarca por el rey. Su primera tarea fue mejorar los instrumentos entonces usados. Aumentó mucho su tamaño, construyendo un cuadrante con un radio de 19 pies y un globo celeste de cinco pies de diámetro, y perfeccionó los métodos de mirar y de graduación/ También determinó los errores de sus instrumentos, dio los límites de precisión de sus observaciones y tuvo en cuenta el efecto de la refracción atmosférica sobre las posiciones aparentes de los cuerpos celestes. Antes de

Tycho Brahe se acostumbraba a hacer las observaciones de una manera hasta cierto punto fortuita, por eso no había habido una reforma radical de los datos antiguos. Tycho hizo observaciones regulares y sistemáticas de errores conocidos, que revelaron problemas ocultos hasta entonces en las imprecisiones anteriores.

Su primer problema surgió cuando apareció una nueva estrella en la constelación Casiopea, el 11 de noviembre de 1572, y permaneció hasta principios de 1574. La opinión científica recibió un fuerte golpe con ello. Tycho intentó determinar su paralaje y demostró que era tan pequeño que la estrella debía estar más allá de los planetas y ser adyacente a la Vía Láctea. Aunque él mismo nunca la aceptó completamente, había sido demostrada definitivamente la mudabilidad de la sustancia celeste. También, aunque los cometas habían sido observados regularmente desde los días de Regiomontano, Tycho fue capaz de demostrar, con sus instrumentos más perfectos, que el cometa de 1577 estaba más allá del Sol y que su órbita debía haber pasado a través de las esferas celestes sólidas, si ellas existían. También se apartó del ideal platónico y sugirió que las órbitas de los cometas no eran circulares, sino ovaladas. Además, la teoría aristotélica sostenía que los cometas eran manifestaciones en el aire. Es significativo que, aunque hubiera sido posible con instrumentos disponibles en la Antigüedad demostrar que los cometas penetraban en el mundo inmutable más allá de la *Luna*, esas observaciones no se realizaran de hecho hasta el siglo XVI. En 1557, Jean Pena, matemático real en París, había defendido con razonamiento óptico que algunos cometas estaban más allá de

la Luna y había rechazado, por tanto, las esferas de fuego y de los planetas. Afirmó que el aire se extendía hasta las estrellas fijas. Tycho fue más allá y abandonó las dos teorías aristotélicas de los cometas y de las esferas sólidas. Al mismo tiempo, el descubrimiento de tierra esparcida por todo el globo llevó a los filósofos de la naturaleza, como Cardano, a abandonar la teoría de esferas concéntricas de tierra y agua, basada en la doctrina aristotélica del lugar natural y del movimiento. Defendieron que el mar y la tierra formaban una única esfera.

Mientras Tycho suministraba las observaciones sobre las cuales basar una descripción geométrica precisa de los movimientos celestes, se vio obligado por dificultades, tanto físicas como bíblicas, a rechazar la rotación de la Tierra. No creía que Copérnico hubiese respondido a las objeciones físicas aristotélicas. Además, antes de que el invento del telescopio hubiera revelado el hecho de que las estrellas fijas, contrariamente a los planetas, aparecen como meros puntos luminosos, y no como discos, se creía habitualmente que brillaban por la luz reflejada, y su brillo era tomado como una medida de su magnitud. Tycho dedujo, por tanto, de la ausencia de paralaje estelar anual observable, que el sistema copernicano podía implicar la conclusión de que las estrellas tenían diámetros de dimensiones increíbles. Elaboró un sistema propio (1588), en el que la Luna, el Sol y las estrellas fijas giraban alrededor de la Tierra estática, mientras que los cinco planetas giraban alrededor del Sol. Esto era geoméricamente equivalente al sistema de Copérnico, pero evitó lo que creía defectos físicos del último e incluyó las ventajas de

sus observaciones. Continuó como una alternativa del de Copérnico (o Ptolomeo) durante la primera mitad del siglo XVII; y cuando Tycho legó sus observaciones a Kepler, que había venido a trabajar con él, le pidió que lo utilizase en la interpretación de sus datos.

Kepler hizo más que eso. Michel Mastín (1550-1631), con el que había estudiado primero, había calculado también, como Tycho, la órbita del cometa de 1577, y declaró que el sistema copernicano era el único capaz de explicarlo. Kepler persistió en esta opinión.

También estaba fuertemente influenciado por el pitagorismo. La visión de la armonía abstracta, según la cual creía que el mundo estaba construido, le sostenía en el duro trabajo del cómputo matemático al que estaba dedicado por sus investigaciones astronómicas y por su trabajo de astrólogo profesional. A lo largo de su vida estuvo inspirado por la búsqueda de una ley matemática sencilla que pudiera enlazar juntos la distribución espacial de las órbitas y los movimientos de los miembros del sistema solar. Después de numerosos ensayos llegó a la idea publicada en su *Mysterium Cosmographicum* (1596), de que los espacios entre las órbitas planetarias correspondían cada uno, de Saturno a Mercurio, a uno de los cinco sólidos regulares o «cuerpos platónicos»: cubo, tetraedro, dodecaedro, icosaedro y octaedro. Su objetivo era demostrar la necesidad de que hubiera seis planetas, y sólo seis, y de que sus órbitas tuvieran el tamaño relativo que tenían, como se había calculado a partir de sus períodos alrededor del Sol. Intentó mostrar que los cinco sólidos regulares podían ser adaptados a las seis órbitas de forma que cada órbita estuviera inscrita en el mismo

sólido sobre el que estaba circunscrita la órbita exterior siguiente. Entonces fue a buscar a Tycho Brahe, que se había trasladado a Praga; sólo de él podía conseguir los valores correctos de las distancias medias y excentricidades que podían confirmar su teoría. Sin embargo, se vio forzado a abandonarla; pero su visión matemática consiguió percibir en los datos de Tycho Brahe los fundamentos de la armonía celeste. Habiendo calculado la órbita de Marte según cada una de las tres teorías vigentes, la ptolemaica, la copernicana y la de Tycho, vio que Copérnico había complicado innecesariamente las cosas al no dejar que las órbitas de todos los planetas pasaran por el Sol. Aun cuando se hacía esta hipótesis, quedaba un error de ocho a nueve minutos en el arco de la órbita de Marte; y esto no podía ser atribuido a la imprecisión de los datos. Esto le obligó a abandonar las hipótesis de que las órbitas planetarias eran circulares y los movimientos de los planetas uniformes, y le llevó a formular sus dos primeras leyes: 1.^a, los planetas se mueven en elipses, con el Sol en uno de sus focos; 2.^a, cada planeta se mueve, no uniformemente, sino de forma que la línea que une su centro con el del Sol barre áreas iguales en tiempos iguales (*Astronomía Nova aitiologetos, seu Physica Coelestis tradita commentariis de motibus stellae Mariis ex observationibus G. V. Tychonis Brahe*, 1609, lámina 7).

En realidad, Kepler descubrió primero la segunda de estas leyes. Una de las dificultades encontradas era la de la considerable variación de la velocidad de Marte en su órbita, de forma que era más rápido cerca del Sol que alejado del Sol. Primero intentó

expresar esta variación matemáticamente, reintroduciendo el ecuante, que Copérnico había rechazado. Pero constató que no había ningún ecuante que permitiera el cálculo preciso de todas las observaciones. Su prueba de que las mismas variaciones ocurrían en la órbita de la Tierra demostraba matemáticamente la semejanza de su movimiento con el de los otros planetas. Vio entonces el problema como el de encontrar un teorema que relacionara la velocidad de rotación de un planeta en cualquier punto a su distancia del Sol en una órbita excéntrica. Resolvió esto por un método de integración por el que mostraba que la duración de un planeta en un arco muy pequeño de su trayectoria era proporcional a su distancia del Sol. Guiado en su enfoque de este problema por su concepto físico de una fuerza o *virtus* que se extendía desde el Sol y movía los planetas, se deducía que esta fuerza motriz era inversamente proporcional a la distancia al Sol. Así, la fuerza motriz era inversamente proporcional a la duración del planeta en un arco de su órbita —una conclusión que concuerda enteramente con la hipótesis dinámica aristotélica de que la velocidad requiere una fuerza motriz.

Fue en el transcurso de estos cálculos y en la comprobación de las posiciones predichas con los datos de Tycho Brahe cuando Kepler comenzó a tener sus dudas revolucionarias sobre si las órbitas planetarias eran realmente circulares. En 1604 había decidido rechazar los movimientos circulares. Como escribió en su *Astronomía Nova*, parte 3, capítulo 40:

Mi primer error fue tomar la trayectoria del planeta como un

círculo perfecto, y este error me robó la mayor parte de mi tiempo, por ser lo que enseñaba la autoridad de todos los filósofos y estar de acuerdo con la Metafísica.

El hecho de que Kepler consiguiese romper lo que Koyré ha llamado el «hechizo de la circularidad», mientras que Galileo no lo hizo, marca un interesante contraste en el carácter de sus platonismos. Galileo negó la distinción ontológica platónica entre las figuras geométricas y los cuerpos materiales; en lo posible, consideró el mundo físico como Geometría realizada; y esto le hacía difícil el negar el *status* privilegiado de la circularidad en la Física y en la Astronomía, mientras lo aceptaba en la Matemática y, como se ha demostrado recientemente, en la Estética (cf. *supra*, pp. 130-131, 144). Kepler, por su parte, conservando la distinción ontológica entre la forma ideal y la realización material, pudo, sin violentar su metafísica platónica, aceptar una desviación de la circularidad impuesta a él por los datos empíricos. Argumentó que los cuerpos celestes, en tanto cuerpos, estaban obligados necesariamente a desviarse del curso perfectamente circular porque sus movimientos no eran la obra de la mente, sino de la naturaleza, de las «facultades naturales y animales» de los planetas, que seguían sus propias inclinaciones, como decía en su *Epitome Astronomiae Copernicanae*, libro 4, parte 3, capítulo 1 (1620).

Kepler, guiado una vez más por su concepción de las causas físicas del movimiento planetario, supuso primero que la órbita no circular era un ovoide que resultaba de dos movimientos independientes,

uno causado por la *virtus* del Sol y el otro por una rotación uniforme del planeta sobre un epiciclo imaginario producido por una *virtus* de él mismo. Kepler se encontró incapaz de tratar matemáticamente las diferentes curvas ovoides que ensayó; decidió, por tanto, utilizar como aproximación las elipses, cuya geometría había sido elaborada completamente por Apolonio. Descubrió que la elipse se adecuaba a su ley de las áreas perfectamente, conclusión empírica para la que más tarde intentó encontrar una explicación física por medio de un movimiento oscilatorio o «libración» del planeta sobre el diámetro de su epiciclo (cf. fig. 6, Mercurio).

Después de diez años de trabajo complementario, llegó a esta tercera ley, publicada en 1619 en *De Harmonice Mundi*: 3.^a, los cuadrados de los períodos de revolución (p_1 , p_2) de dos planetas cualesquiera son proporcionales a los cubos de sus distancias medias (d_1 , d_2) al Sol (C), esto es,

$$\frac{p_1^2}{p_2^2} = \frac{d_1^3}{d_2^3}$$

Esta era la ley que Kepler había buscado desde el principio de su carrera, pero realizó su descubrimiento al final y de una forma casi accidental. Siguiendo el método de ensayo y error hizo una serie de comparaciones de las velocidades instantáneas y de los períodos y las distancias de los distintos planetas, pero no consiguió ninguna fórmula significativa. Finalmente ensayó comparaciones de potencias de estos números, y encontró que los de su «tercera ley»

daban una adecuación empírica exacta.

No se hubieran podido formular estas leyes sin la obra de los geómetras griegos, en particular Apolonio, sobre las secciones cónicas. Este tema había sido desarrollado por Maurolico y por el propio Kepler en un comentario sobre Witelo (1604). Al deducir su segunda ley, Kepler hizo una contribución a las Matemáticas al introducir la innovación, que consideraciones de estricta lógica habían impedido hacerla a los griegos, de considerar un área como constituida por un número infinito de líneas engendradas por el giro de una curva sobre su eje (cf. *supra*, p. 120). Para la integración requerida por su segunda ley empleó un método semejante al utilizado por Arquímedes para determinar el valor de π . La obra de los astrónomos prácticos fue también muy facilitada por los perfeccionamientos de los métodos de cómputo, primero por el uso sistemático de fracciones decimales introducido por Stevin, pero sobre todo por la publicación en 1614 del descubrimiento de los logaritmos por John Napier (1550-1617). Siguiendo esto, otros matemáticos calcularon tablas para las funciones trigonométricas y adaptaron los logaritmos a la base natural e . La regla de cálculo fue inventada por Guillermo Oughtred en 1622. Kepler utilizó algunas de estas innovaciones para poner en orden sus resultados prácticos personales, y de la de Tycho, para las *Tablas Rudolfinas*, publicadas en 1627.

Las tres leyes de Kepler proporcionaron una solución definitiva al antiguo problema de descubrir un sistema astronómico que a la vez «salvara» las apariencias y describiera las trayectorias «reales» de los

cuerpos a través del espacio. El «tercer movimiento» de Copérnico para la Tierra fue abandonado porque, no habiendo esferas celestes, los fenómenos que explicaba al suponerlo se atribuían sencillamente al hecho de que el eje de la Tierra permanecía paralelo a sí mismo en todas las posiciones. El invento independiente del telescopio (con aumentos hasta de treinta veces) por Galileo añadió confirmaciones a la teoría «copemicana». Una de las objeciones de Tycho a esta teoría fue eliminada cuando Galileo fue capaz de probar que las estrellas fijas no tenían las dimensiones increíblemente enormes que Tycho había supuesto que deberían tener basándose en la hipótesis de que el brillo era proporcional a la magnitud, para que fueran tan brillantes como eran a una distancia suficiente de ellas para *no mostrar ningún* paralelismo,• esto lo consiguió al hallar la distancia a la que una cuerda tensada *de* grosor conocido podía eclipsarlas exactamente. Galileo dividió también partes de la Vía Láctea en estrellas individuales, y confirmó la deducción de Copérnico de que Venus, a causa de la posición que él defendía tenía en el interior de la órbita de la Tierra, tendría fases completas como la Luna. El otro planeta inferior, Mercurio, tenía también fases completas, mientras que Marte tenía únicamente fases parciales (cf. fig. 6). En 1631 Pierre Gassendi observó el tránsito, que Kepler había predicho, de Mercurio a través del disco del Sol, y estableció que describía una órbita entre el Sol y la Tierra. El tránsito de Venus fue observado en 1639 por el astrónomo inglés Jeremiah Horrocks (1619-1641). Galileo, en su *Sidereus Nuncius* (1610), describió las montañas de la Luna y los cuatro satélites de

Júpiter, que tomó como modelo del sistema solar de Copérnico. Mas tarde observó Saturno deformado (su telescopio no podía distinguir los anillos) y pudo demostrar que las variaciones del tamaño aparente de Marte y Venus correspondían a las distancias de estos cuerpos a la Tierra, según la hipótesis copernicana. Sus observaciones de las manchas solares, por medio de las cuales pretendía estimar su velocidad de rotación, añadió nueva evidencia contra la teoría aristotélica de la inmutabilidad. Las manchas solares fueron también descritas por Johann Faber, Harriot y el jesuita Christopher Scheiner (1611), que poco después construyó un telescopio que incorporaba las mejoras sugeridas por Kepler (cf. *infra*, pp. 225-226).

La teoría astronómica de los primeros años del siglo XVII fue, pues, el resultado de la alternancia práctica de hipótesis y observación que se había seguido desde Copérnico. Kepler hizo una exposición de su concepción de la Filosofía y de los métodos de la Astronomía en el primer libro de su manual, *Epitome Astronomiae Copernicanae* (1618). Concebía que la Astronomía comenzaba por las observaciones, que eran traducidas por medio de los instrumentos de medida y longitudes y números para ser tratadas por la Geometría, el Algebra y la Aritmética. Luego se ideaban hipótesis que unían las relaciones observadas en sistemas geométricos que «salvaran las apariencias». Finalmente, la Física estudiaba las causas de los fenómenos relacionados por una hipótesis, que debía estar de acuerdo también con los principios metafísicos. Toda la investigación pretendía descubrir los verdaderos movimientos

planetarios y sus causas, escondidos en la actualidad en las «pandectas de Dios», pero que debían ser revelados por la Ciencia.

La obra de Kepler fue mucho más que el simple descubrimiento de las verdaderas leyes descriptivas del movimiento planetario; también hizo las primeras sugerencias de una nueva cosmología física con la que ellas se adecuarían. El que no tuviera éxito en este intento es en parte una medida de la extrema dificultad del problema, que fue únicamente resuelto cuando Newton unió las leyes planetarias de Kepler con el complemento de la dinámica terrestre de Galileo por medio de la ley puente de la gravitación universal. A esta ley puente Kepler suministró tanto una contribución positiva como una orientación de la investigación. De acuerdo con el prefacio del *De Revolutionibus* se había generalizado la opinión, como expresaba Francis Bacon en su crítica a Copérnico en su *Novum Organum* (libro 2, aforismo 36), de que el sistema heliostático había sido «inventado y supuesto para abreviar y facilitar los cálculos», pero que no era literal y físicamente verdadero. «No hay necesidad de que estas hipótesis sean verdaderas, ni aun de que sean parecidas a la verdad», había escrito Ossiander en este prefacio; «más bien, una sola cosa les basta: que puedan proporcionar un cálculo que esté de acuerdo con las observaciones». Fue Kepler el primero en detectar que Copérnico no había escrito esas palabras. Las rechazó vigorosamente. La meta de la investigación, insistía, era descubrir cómo se movían realmente los planetas, y no solamente cómo, sino por qué se movían como lo hacían, y no de otro modo: «De forma que yo podría atribuir el

movimiento del Sol a la misma Tierra por razonamiento físico, o más bien metafísico, como Copérnico hizo por razonamiento matemático», decía en el prefacio del *Misterio Cosmográfico*.

De hecho Kepler hizo sus descubrimientos de las tres leyes del movimiento planetario cuando buscaba mucho más, en el curso de una investigación metafísica, por detrás de las apariencias visibles, de las armonías subyacentes expresadas en las relaciones puramente numéricas que él defendía que constituían la naturaleza de las cosas: las *harmonice mundi* que se hacían manifiestas en los movimientos planetarios y en la música: una auténtica «música de las esferas». Un lector no preparado para las singularidades de los procesos mentales de Kepler podría encontrar la masa de sus difíciles obras —interesadas tanto por cuestiones como la naturaleza de la Trinidad, de la armonía celeste y de la relación entre el conocimiento divino y del humano, como por la Astronomía— como una ganga casi ininteligible en la que, en cierto modo, hay incrustadas gemas de ciencia. Pero esto sería no entender completamente la organización de su pensamiento; y sería perder una clave obvia del elemento quizá más importante de todo pensamiento científico original: el puente de la imaginación y la intuición por medio del cual atravesaba el hiato lógico desde los resultados inmediatos de la observación a la teoría por la que explicaba esos resultados. Todas las pruebas apuntan a que el puente estaba constituido en la mente de Kepler por las preconcepciones de las investigaciones metafísicas de las que su ciencia era una parte. Desarrollada primero por analogía con las

relaciones entre las personas de la Trinidad, su concepción de la estructura del universo se convirtió en parte de un credo teológico. Pero también entraba en los presupuestos de Kepler —un punto que salió a la luz vivamente en una controversia sobre el tema con el rosacruciano inglés Robert Fludd (cf. *infra*, p. 222)— el que la verdadera estructura y armonías del universo eran las verificadas en la observación. Después de su primera visita a Tycho Brahe en 1600 escribió en una carta a su amigo Fierwart von Hohenburg:

*Habría concluido mi investigación sobre las armonías del mundo si la astronomía de Tycho no me hubiera fascinado tanto que casi estaba fuera de mí; todavía me maravilla lo que podría progresarse en esta dirección. Una de las más importantes razones de mi visita a Tycho fue el deseo, como sabes, de aprender de él figuras más correctas de las excentricidades para examinar mi *Mysterium* y las *Harmonice* mencionadas para compararlas. Porque estas especulaciones a priori no deben entrar en conflicto con la evidencia experimental; más bien, deben estar de acuerdo con ella.*

Al desarrollar este criterio de la confirmación empírica tuvo en cuenta el alcance de la confirmación, afirmando, por ejemplo, que la hipótesis copernicana era «más verdadera» que la ptolemaica, porque, de las dos, ella sola podía disponer los planetas alrededor del Sol en un orden de acuerdo con sus períodos. Las leyes de Kepler del movimiento planetario y su intento de explicarlas fueron, pues, por decirlo así, cinceladas en las opiniones preconcebidas de

su metafísica neoplatónica, por una aplicación lo más estricta posible de los métodos cuantitativos y del principio de la prueba experimental. Es esto lo que le convierte en un ejemplo interesante del pensamiento científico, tan diferente de las austeridades de una interpretación positivista u «operacionalista» o de los cánones de J. Stuart Mili.

La concepción metafísica central de Kepler era la de la existencia desde la eternidad en la mente de Dios de ideas arquetípicas, que eran reproducidas, por una parte, en el universo visible, y por otra, en la mente humana. Entre ellas, la Geometría era el arquetipo de la creación física y era innata a la mente humana. Como escribía en 1599 a Herwart von Hohenburg:

Para Dios hay, en el mundo material entero, leyes materiales, números y relaciones de especial excelencia y del mayor orden apropiado... No intentemos, pues, descubrir más del mundo inmaterial y celeste que lo que Dios nos ha revelado. Esas leyes están dentro del ámbito de la comprensión humana; Dios quiso que las reconociéramos al crearnos según su propia imagen, de manera que pudiéramos participar en sus mismos pensamientos. Porque ¿qué hay en la mente humana, aparte de números y magnitudes? Es solamente esto lo que podemos aprehender de manera adecuada; y si la piedad nos permite decirlo así, nuestro entendimiento es, en este aspecto, del mismo tipo que el divino, por lo menos en la medida en que podemos captar algo de él en nuestra vida mortal. Solamente los tontos temen que hagamos al hombre divino al decir esto; porque los

designios de Dios son impenetrables, pero no lo es su creación material.

A esta concepción añadió la antigua doctrina de la *signatura rerum*, de los signos de las cosas, según la cual se defendía que la forma externa de una cosa señalaba a unas propiedades y a un nivel de realidad que no eran directamente visibles. En el *Misterio cosmográfico* describió extensamente el universo visible como un signo o imagen de la Trinidad, con la forma más perfecta de la esfera: el Padre estaba representado por el centro; el Hijo, por la superficie exterior, y el Espíritu Santo, por el radio, que tenía una igualdad de relación entre el centro y la superficie³¹. Dios, al crear el universo visible de acuerdo con este simbolismo geométrico, colocó en el centro un cuerpo para representar al Padre por sus irradiaciones de poder y luz: éste era el Sol. Kepler, siguiendo el precedente de las cosmologías neoplatónicas anteriores, por ejemplo, la de Grossetesta (*vide* vol. I, pp. 75-76), concibió todas las potencias naturales como fluyendo de los cuerpos para asumir una forma esférica; y de ese modo, por analogía con el poder que emanaba del Padre, el Sol se convertía en el instrumento que daba forma visible y vida al cosmos y a todo en él, un universo en el que todo estaba animado. Era el *anima motrix*, o «alma motriz», del Sol la que movía los planetas en torno en sus órbitas circulares, y también los cometas, con una velocidad que dependía de su potencia después de que había alcanzado sus distancias respectivas. Se ha sugerido que fue porque Kepler abordó el problema de los

movimientos planetarios con su imagen arquetípica en el pensamiento por lo que se convirtió en un copemicano convencido³². Es verdad que nunca abandonó las *animae motrices* como las fuerzas motrices «físicas», aun después de haber sido obligado por los datos de las observaciones que obtuvo de Tycho Brahe a prescindir de las órbitas circulares. Fue alentado en el empleo continuado de estas concepciones causales como una guía de sus investigaciones matemáticas por las explicaciones que Guillermo Gilbert había dado de sus recientes descubrimientos sobre el magnetismo.

Gilbert era médico de la corte de la reina Isabel de Inglaterra, que le concedió una pensión para proseguir su investigación. Tuvo un interés considerable por la Astronomía, pero su principal logro fue el trabajar sistemáticamente en un campo completo de la investigación científica, el campo del Magnetismo y de la Electricidad, en cuanto era posible estudiarla entonces. El *De Magnete* (1600) de Gilbert, aunque contenía algunas medidas, era enteramente no matemático en el enfoque, y es el ejemplo más llamativo de la independencia de las tradiciones experimental y matemática en el siglo XVI (cf. *supra*, p. 128). En gran parte derivó sus métodos de Petrus Peregrinus, cuya obra había sido impresa en 1558, y de constructores prácticos de brújulas, como Robert Norman, un marino retirado, cuyo libro *The Newe Attractive* (1581) contiene el descubrimiento personal de la inclinación magnética. Esta había sido observada primero por Georg Hartmann, en 1554. Gilbert extendió la obra de Peregrinus para demostrar que la fuerza y alcance de una piedra imán

uniforme era proporcional al tamaño. También mostró que el ángulo de inclinación de una aguja suspendida libremente variaba con la latitud. Peregrinus había comparado las líneas de dirección de la aguja trazadas sobre un imán esférico con los meridianos y llamó polos a los puntos en que se encontraban. Gilbert infirió, a partir de las orientaciones en las que se colocaban los imanes respecto de la Tierra, que esta última era en sí misma un gran imán con sus polos en los polos geográficos. Confirmó esto demostrando que el mineral de hierro estaba imantado según la dirección en la que se encontraba en la Tierra. Las propiedades de las piedras imán y de la brújula fueron incluidas así en un principio general.

Gilbert realizó también un estudio de los cuerpos electrificados, que él llamó *eléctrica*. Demostró que no solamente el ámbar, sino también otras sustancias, como el vidrio, el azufre y algunas piedras preciosas, atraían pequeñas cosas cuando eran frotadas; identificaba un cuerpo «eléctrico» utilizando una pequeña aguja metálica equilibrada en un punto. Señaló que mientras que el imán atraía solamente sustancias imantables, que disponía en orientaciones determinadas, y no era afectado por la inmersión en el agua o por pantallas de papel o de lino, los cuerpos electrificados atraían todo y lo amontonaban en masas informes y eran afectados por pantallas y por la inmersión. Niccolo Cabeo (1585-1650) observó más tarde que los cuerpos se dispersaban de nuevo después de haber sido atraídos; Sir Thomas Browne dijo que eran *repelidos*. El empirismo de Gilbert se extendía solamente a los hechos que había demostrado. Utilizó una balanza para refutar la antigua leyenda,

aceptada por Cardano, de que el imán se alimentaba de hierro; pero sus explicaciones del Magnetismo y de la Electricidad, aunque no estaban en desacuerdo con los hechos, no se elevaban por encima de ellos. Su explicación era, de hecho, una adaptación de la teoría de Averroes sobre la «especie magnética» en un cuadro de animismo neoplatónico. Partiendo del principio de que un cuerpo no podía actuar donde no estaba, ya que toda acción en que interviene la materia debía ser por contacto, afirmó que si parecía haber acción a distancia, debía existir un «efluvio» material responsable de ella. Ese efluviio, afirmaba, era desprendido por los cuerpos electrificados gracias al calor de la fricción. Excluyó la atracción magnética de esta explicación, porque, ya que podía pasar a través de la materia, no podía deberse a un efluviio material; el movimiento del hierro hacia el imán se parecía más bien al de un alma moviéndose por sí misma. Pero extendió la teoría de los efluvios para explicar la atracción por la Tierra de los cuerpos que caen, siendo en este caso la atmósfera el efluviio. Sin entrar en detalles, atribuyó la rotación diaria de la Tierra, que él aceptaba, a la energía magnética, y los movimientos ordenados del Sol y de los planetas a la interacción de sus efluvios.

Kepler también se interesó por el Magnetismo, y la obra de Gilbert le estimuló a utilizar ese fenómeno para explicar la física del universo. En este asunto aceptó la concepción aristotélica común del movimiento como un proceso que exigía la operación continuada de una fuerza motriz. Siendo joven, al leer a Scaligero había adoptado la doctrina de Averroes sobre las Inteligencias que movían los

cuerpos celestes, pero la abandonó después porque quería tener en cuenta solamente las causas mecánicas. Explicó la rotación diaria continua de la Tierra sobre su eje por medio del *Ímpetus* que Dios le había imprimido en la creación. Pero, como Nicolás de Cusa, identificó este *ímpetus* con el alma (*anima*) de la Tierra, reintroduciendo así el equivalente de una Inteligencia. Afirmaba que este *ímpetus* no se corrompía, porque, según la teoría pitagórica de la gravedad, que él aceptaba, el movimiento circular podía considerarse, sin contradicción, como el movimiento natural de la Tierra. Para responder a las objeciones tradicionales a la rotación diaria de la Tierra desarrolló las sugerencias de Gilbert. Consideró que de la *anima motrix* de la Tierra emanaban radialmente líneas, o cadenas elásticas de fuerza, que él sostenía que eran magnéticas, y arrastraban a la Luna y a todos los cuerpos proyectados sobre la superficie de la Tierra. Líneas semejantes surgidas de las *animae motrices* de Júpiter y Saturno arrastraban a sus satélites, y líneas procedentes del Sol arrastraban a todo el sistema planetario cuando el Sol giraba alrededor de su eje. Fue esta teoría de la fuerza magnética, que disminuía al aumentar la distancia, de manera que la velocidad de un planeta en su órbita variaba inversamente con la distancia del Sol, la que le llevó a su segunda ley. La rotación del Sol haciendo oscilar sus líneas magnéticas en un torbellino movería los planetas en círculo; la existencia de órbitas elípticas trató de explicarla por las oscilaciones provocadas por la atracción y repulsión de sus polos. Además, así como la fuerza motriz del Sol era magnética, así había igualmente una analogía entre el

magnetismo y la gravitación. La gravitación era la tendencia de los cuerpos análogos a unirse; si no fuera por la fuerza motriz que arrastraba a la Luna y a la Tierra en sus órbitas, se precipitarían una contra otra, encontrándose en un punto *intermedio*. Esta era una idea enteramente nueva.

Fue la idea de Kepler de que un satélite era mantenido en su órbita por *dos* fuerzas, una la atracción mutua radial con el cuerpo central y la otra la fuerza motriz del *anima motrix* que le impulsaba lateralmente, la que hizo que su sistema físico fuera la vía de acceso a la unificación de la dinámica terrestre y celeste por Newton. El comienzo del logro de Kepler en esta dirección fue su desarrollo del concepto pitagórico de gravedad. Oresme, Copérnico, Gilbert y Galileo habían rechazado todos el concepto de gravedad de Aristóteles, en cuanto tendencia a moverse hacia un lugar particular, el centro del universo, y lo reemplazaron por la gravedad, en cuanto tendencia de cuerpos análogos a unirse; y la analogía con el Magnetismo había ya sido propuesta por más de un autor medieval antes de que fuera explotada de nuevo por Gilbert. Kepler consideró esta tendencia como siendo causada por una atracción real (*virtus tractorta*) ejercida externamente por un cuerpo sobre otro. Su innovación consistió en hacer que la atracción (tanto en la gravitación como en el magnetismo) fuera *reciproca* y expresarla entonces en forma dinámica. Escribía en la introducción a su *Astronomía Nova*:

Si dos piedras fueran colocadas cerca una de otra en cualquier lugar del universo fuera de la esfera de fuerza (virtus) de un

tercer cuerpo análogo, se comportarían como dos cuerpos magnéticos y se reunirían en un punto intermedio, recorriendo cada una de ellas una distancia hacia la otra en la misma proporción en que la masa (moler) de esta otra se encuentra respecto a la suya propia.

Postulando que la Tierra y la Luna eran cuerpos análogos, como dos piedras, continuaba:

Si la Tierra y la Luna no fueran mantenidas, cada una en su órbita, por sus fuerzas animales y otras equivalentes, la Tierra ascendería hacia la Luna una cincuenta y cuatro^{ava} parte de la distancia entre ellas, y la Luna descendería hacia la Tierra unas cincuenta y tres partes; y se unirían; suponiendo la sustancia de cada una sola e idéntica densidad.

Concluyó que la fuerza atractiva de la Luna se extendía, efectivamente, hasta la Tierra a partir del flujo y reflujo de las mareas, que suponía estaban provocadas por la Luna, que estiraba el agua hacia ella: una teoría que Grosetesta había prefigurado y que nos recuerda una vez más la persistencia de las complejas ideas que acompañaban al neoplatonismo (cf. vol. I, p. 118). Kepler supuso igualmente que una fuerza mucho más potente se extendía de la Tierra hacia la Luna y más allá de ella.

Kepler desarrolló su teoría de la gravitación solamente aplicándola a la Tierra y a la Luna: no suponía que el Sol, por ejemplo, y los planetas fueran cuerpos análogos que se atraían recíprocamente.

También fracasó en no captar la significación cosmológica de la ley del inverso del cuadrado, que formuló como una ley fotométrica que relacionaba la intensidad de la luz con la distancia de su fuente, por ejemplo, el Sol. Desplegando a la vez su filosofía de la ciencia uniformemente «realista» y el conjunto de asociaciones neoplatónicas que iban adheridas a todos los estudios de la «cosmología de la luz» (cf. vol. I, pp. 75-76, 96-97, 118), describió el curso de sus investigaciones sobre las fuerzas motrices que hacían girar los planetas, en la introducción a su *Astronomía Nova*:

He comenzado diciendo que en esta obra trataré la Astronomía no sobre la base de hipótesis ficticias (hypotheses ficticiae), sino sobre la base de causas físicas, y que para este propósito he visto que es necesario proceder por etapas. La primera etapa fue la demostración de que las excéntricas de los planetas concurrían en el cuerpo del Sol. Luego, deduciendo por razonamiento, probé, como había demostrado Tycho, que, puesto que los orbes sólidos no existen, se seguía de ello que el cuerpo del Sol es la fuente y la sede de la fuerza que hace que todos los planetas giren alrededor del Sol. Demostré igualmente que el Sol realiza eso de la siguiente forma: aunque permanece en el mismo lugar, el Sol gira, sin embargo, como sobre una torre y emite, de hecho, a través de la anchura del mundo, una especie (species) inmaterial de su cuerpo, análoga a la especie inmaterial de su luz.

Esta especie, a causa de la rotación del cuerpo solar, gira en forma de torbellino muy rápido que se extiende a través de toda

la inmensidad del universo y arrastra a los planetas con ella, arrastrándolos en un círculo con una vehemencia (raptus) que es más intensa o más débil según que la densidad de esta species, de acuerdo con la ley de su flujo (effluxur), sea mayor o menor.

La interacción de los motores individuales de los planetas con este motor común producía entonces la desviación del círculo. Hasta aquí todo iba bien. Kepler había suscitado por primera vez la cuestión de qué movía los planetas, ya que las esferas no existían. En su *Ad Vitellionem Paralipomena* (1604), Kepler había demostrado que si, como él sostenía, la luz y las otras fuerzas (*virtus, species*) se expandían a partir de su fuente formando una esfera, entonces su potencia debía disminuir como el área de la superficie de la esfera, esto es, en proporción al cuadrado del radio. Pero en su *Epitome Astronomiae Copernicanae* (libro 4, parte 2, capítulo 3; 1620) negó específicamente que esta ley fotométrica fuera aplicable a la fuerza motriz del Sol, que decía disminuía en proporción *simple* a la distancia. Trató de argumentar que la ley del inverso del cuadrado se aplicaba solamente a la luz del Sol. Su argumento consistía en que mientras que la luz del Sol se expandía en esfera, de manera que su intensidad decrecía según el aumento del área de la superficie de la esfera, la fuerza motriz del Sol se expandía solamente en el *plano* de cada órbita planetaria y decrecía con el aumento lineal de la circunferencia. Realmente, estaba muy lejos de aplicarla a la *atracción* entre el Sol y los planetas.

De hecho, Kepler se parece a Galileo en cuanto que proporcionó

elementos para un principio unificador de la Cosmología, cuya necesidad captó claramente, pero que no llegó a realizar. Las omisiones de ambos son curiosamente complementarias y presentan una rara simetría para la preparación de la síntesis newtoniana. Ni Galileo ni Kepler habían captado realmente el problema dinámico presentado por los planetas. Galileo creyó, como Copérnico, que las revoluciones planetarias eran un movimiento «natural»; esto es, que no necesitaban un motor externo y que podían ser admitidas basándose solamente en el orden. Galileo fue capaz de defender esto porque prescindió de la demostración de Kepler de las órbitas elípticas, que, ciertamente, conocía. Si lo hizo por razones metafísicas o estéticas, o sencillamente, como decía en 1614, porque la obra de Kepler era «tan oscura que, aparentemente, el autor no conoce lo que está tratando», el resultado fue que continuó considerando que los planetas giraban en círculo (cf. *supra*, p. 147). En todo caso, no admitió que los planetas necesitaran ninguna fuerza, lateral o centrípeta, para mantenerse en sus órbitas. Ignorando conscientemente las leyes descriptivas de Kepler, no pudo ver que la geometría real del firmamento hacía defectuoso cualquier modelo esférico, y por ello no vio el problema de cómo los planetas se mantenían en sus órbitas elípticas.

El intento de Kepler para resolver este problema, al contrario, estaba viciado por su fallo en captar todo el significado del principio de inercia que había sido claramente entendido, aunque incompletamente enunciado por Galileo en su segunda *Carta sobre las manchas del Sol*, en 1612³³. Siguiendo con la suposición de que

la velocidad uniforme continua necesitaba una fuerza motriz continua, Kepler creyó que ésta era proporcionada por la *specie motrix o virtus motoria* que suponía emanaba del Sol; y puesto que éste impulsaba el giro de los planetas lateralmente, no supuso que fuera necesaria una fuerza centrípeta para mantenerlos en sus órbitas y que no volaran tangencialmente. Fracasó en captar el significado universal del modelo que él mismo había establecido para la Tierra y la Luna.

La incertidumbre que el mismo Kepler parece haber sentido en sus investigaciones del vasto problema que había emprendido se manifiesta en los cambios que hizo, después de cada fracaso, en su enfoque de la explicación científica³⁴. Después de haber descubierto que la teoría planetaria propuesta en el *Mysterium Cosmographicum* no se adecuaba a los hechos, cambió del concepto de explicación satisfactoria como aquella en la cual se descubren armonías matemáticas en el caos de las observaciones, a una concepción mecánica del universo como guía reguladora y heurística de las investigaciones, como la publicó en la *Astronomía Nova*. El mismo título de esta obra es revelador: *La Nueva Astronomía estudiada por medio de las Causas, o Física Celestial Explicada en Comentarios sobre los Movimientos de Marte basados en Observaciones de Tycho Brahe*. Mientras preparaba esta obra escribió en 1605 a Herwart von Hohenburg:

Estoy muy atareado con la investigación de las causas físicas. Mi propósito es demostrar que la máquina celeste ha de ser comparada no a un organismo divino, sino más bien a un

mecanismo de relojería..., en la medida en que casi todos los múltiples movimientos se realizan gracias a una única fuerza magnética muy sencilla, como en el caso de una maquinaria de relojería; todos los movimientos [son causados] por un simple peso. Además, demuestro cómo esta concepción física ha de ser presentada por medio del Cálculo y la Geometría.

En último término, la teoría física de la *species motrix* que emanaba del Sol, propuesta en la *Astronomía Nova*, también se reveló como un fracaso empírico, porque se observó que la velocidad aparente de la rotación del Sol, que entonces se creía que se medía por la de las manchas solares, no concordaba con la de los planetas. En su obra siguiente, Kepler se contentó con su concepción de la armonía matemática como criterio de explicación satisfactoria; y en las *Harmonice Mundi* anunció su tercera ley sin hacer ningún intento de deducirla de principios mecánicos. En esta concepción de la «armonía» estaban implicados dos significados completamente distintos. Según el primero, la segunda ley era armoniosa, por ejemplo, porque demostraba que la velocidad de las áreas era constante; y hay que señalar que de la misma forma que la velocidad angular constante de Ptolomeo era más abstracta y alejada de la observación inmediata que la velocidad lineal constante directamente observable de Aristóteles, así también la velocidad de las áreas de Kepler fue un descubrimiento de constancia o uniformidad en un nivel de abstracción más elevado. El segundo significado de la armonía de Kepler se aplicaba a la

«adecuación» o «rectitud» de la estructura del universo, por ejemplo, el «lugar justo» del Sol en el centro. Los dos sentidos no parecen tener conexión lógica, pero ambos cumplieron funciones reguladoras y heurísticas en toda la obra de Kepler.

Debido a que solamente podían ver partes del cuadro de conjunto que iba a emerger más tarde, los intentos de Kepler y Galileo para responder, no sólo a las objeciones tradicionales contra el movimiento de la Tierra, sino también para dar argumentos concluyentes en favor de él, no convencieron a la mayor parte de sus contemporáneos. Por ejemplo, las cadenas magnéticas adoptadas por Kepler para explicar el movimiento de la Luna hubieran hecho imposible todo movimiento de proyectiles. Galileo estaba mejor situado para la tarea negativa de refutar las objeciones al movimiento de la Tierra. Por ejemplo, era capaz de demostrar, con sus conceptos de *impeto* y de la composición de los *impeti*, que el argumento de los «cuerpos separados» perdía sus premisas. En su *Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo, el ptolemaico y el copernicano* (título que revela su indiferencia respecto a Tycho Brahe y Kepler) señaló que esos cuerpos conservarían la velocidad recibida de la rotación de la Tierra, a menos que fueran forzados a comportarse de otra manera. La objeción mecánica que todavía quedaba frente a la teoría «copernicana» provenía de la «fuerza centrífuga». Galileo argumentó que ésta dependía, no de la velocidad lineal de un punto sobre la superficie de la Tierra, sino de la velocidad angular de rotación, y que, por tanto, no era mayor sobre la superficie de la Tierra que sobre un cuerpo más pequeño que

tuviera una rotación cada veinticuatro horas. Sería despreciable comparada con la gravedad. Realmente, la fuerza centrífuga depende a la vez de la velocidad lineal y de la angular, como demostró por primera vez Huygens, Aunque la demostración del movimiento de la Tierra continuaba siendo una de las metas principales de la obra dinámica de Galileo, fue incapaz, en último término, a pesar de todos sus decididos esfuerzos, de hacer más que mostrar que esto era, al menos, tan probable como la hipótesis de que estaba en reposo.

Fue gracias a una comparación explícitamente sin restricciones y universal de los cuerpos terrestres con los de los cielos como Newton, con la ayuda indispensable de algunos autores intermedios, produjo finalmente la síntesis de sus *Principia Mathematica* (1687). Newton unió las leyes cinemáticas de Galileo sobre la caída de los cuerpos y sobre los proyectiles y su propia formulación del principio de inercia con las leyes descriptivas de Kepler de los movimientos planetarios y su propia formulación del concepto de la gravitación universal (cf. *supra*, pp. 144-151). Pudo entonces, comparando un planeta con un proyectil, atribuir el movimiento hacia adelante de cada uno de ellos a la inercia, y la desviación de la trayectoria rectilínea a la gravitación. Un planeta era, pues, un proyectil cuya velocidad le impedía que cayera sobre la Tierra, de manera que su órbita formaba una elipse en vez de una parábola³⁵. Newton demostró que la aceleración de la caída de la Luna en su órbita elíptica alrededor de la Tierra era igual a la exigida por la ley de la caída libre de Galileo; lo mismo se aplicaba a

las órbitas de los planetas alrededor del Sol. Dedujo la tercera ley de Kepler a partir de su ley del inverso del cuadrado de la gravitación universal³⁶. Demostró que era dinámicamente imposible que el Sol enorme gigara alrededor de la Tierra diminuta, pero que un cuerpo central y sus satélites deben girar alrededor de un centro de gravedad común, que en el sistema solar se encontraba dentro de la superficie del Sol. De este modo triunfó donde Galileo y Kepler habían fracasado, no sólo refutando los argumentos contra el movimiento de la Tierra, sino mostrando que los argumentos en su favor eran irresistibles. Eran irresistibles en un sistema de dinámica universal confirmado en todos los campos comprobados de la observación. Por primera vez desde que, en la época helenística, las observaciones habían obligado a los astrónomos a abandonar las esferas concéntricas de Aristóteles en favor de los artificios matemáticos, inexplicables físicamente, de los epiciclos y excéntricos y habían producido la dicotomía entre la explicación física de los movimientos celestes y los procedimientos matemáticos para predecirlos —la dicotomía entre la cosmología física de Aristóteles y la astronomía matemática de Ptolomeo que persistió durante la Edad Media—, se pudo disponer de un criterio para escoger un sistema de cálculo con preferencia a otro, que era igualmente exacto, al hacer predicciones en el campo de la Astronomía. La elección se decidía mostrando que solamente uno de los sistemas alternativos era compatible con un campo más amplio de observaciones. El logro de Newton fue poner en acción el criterio dinámico, atisbado y preparado por Galileo y Kepler, y el unir por

primera vez la explicación con el procedimiento de predicción. Comenzando con los mismos axiomas físicos fundamentales de las leyes del movimiento y de la gravitación, las etapas seguidas al establecer la *explicación* de los movimientos de los cuerpos eran exactamente las mismas que se realizaban al *predecir* sus movimientos. De ese modo, dentro de una síntesis auténtica de física-matemática, desapareció la Cosmología como una ciencia de las «naturalezas» independiente del cálculo y de los procedimientos de predicción (cf. vol. I, pp. 70 y ss., 85 y ss.; también *infra*, pp. 266 y ss.).

Otra dificultad que persistía para el sistema heliocéntrico, desde el punto de vista de la observación, y que Galileo no había podido resolver, era la de la ausencia de paralaje estelar. Esta fue observada por primera vez, en 1838, por F. W. Bessel, en la estrella 61 del Cisne, aunque James Bradley, cuando buscaba paralajes, había observado en 1725 que las estrellas fijas describían pequeñas elipses exactamente durante la duración del año terrestre, y que las estrellas desde los polos de la eclíptica a la eclíptica describían figuras que eran cada vez menos circulares y que se aproximaban cada vez más a líneas rectas. Esto era una prueba convincente del movimiento en elipse de la Tierra alrededor del Sol, pero Bradley reconoció que lo que él había observado no eran elipses paralácticas, sino elipses aberrantes, debidas a la aproximación de la Tierra en un tramo de su órbita a la luz procedente de las estrellas y al alejamiento de dicha luz en el resto de la órbita.

Galileo entró en conflicto con algunos teólogos contemporáneos por

esta visión de una cosmología unificada físico-matemática; los otros aspectos de sus dificultades con la Inquisición romana y el curso de su proceso pertenecen más bien a la historia de la política eclesiástica de Roma y al procedimiento judicial —en este caso, muy oscuro— que a la Historia de la Ciencia. Sin embargo, es significativo el que fuera un problema teológico, el de la relación entre la teoría astronómica y las Escrituras, entre la cosmología descubierta por el razonamiento científico y la presentada como revelada por Dios, el que tuviera que hacer de la verdad de la visión «realista» de la ciencia compartida por Galileo y Kepler el gran problema del día en la filosofía de la Ciencia. Oresme había ya estudiado los mismos pasajes de las Escrituras —y retrocedió ante ellos—, que debían ser *literalmente* falsos si la nueva cosmología era literal y físicamente verdadera (*vide supra*, pp. 80 y ss.). Por ejemplo, la orden de Josué al atardecer de la batalla de Gabaón: «Sol, detente sobre Gabaón; y tú, Luna, sobre el valle de Ayalón. Y el Sol se detuvo, y se paró la Luna...» (*Josué*, X, 12-13), implicaba que el Sol estaba habitualmente en movimiento. Otros pasajes contradecían el otro postulado esencial de Copérnico: el que la Tierra se movía; por ejemplo, el Salmo 93, «cimentó el orbe: no se conmoverá». Dando por supuestas las diferentes ventajas matemáticas y prácticas de la nueva astronomía, como todos reconocían, había dos formas de evitar ese conflicto. Una era abandonar la interpretación literal de las Escrituras, un procedimiento que había sido seguido, aunque con las precauciones adecuadas, por los mismos Santos Padres cuando la ocasión lo

había exigido. La otra forma era debilitar la verdad de la ciencia de la naturaleza, considerando la teoría astronómica no como un descubrimiento del mundo físico real, un mundo de leyes abstractas quizá, pero cognoscibles como verdaderas, sino como una ficción convencional para realizar cálculos, «meramente una imaginación poética, un sueño», «una quimera», como Galileo escribía irónicamente en una carta a Leopoldo de Austria en 1618.

Después de algunos preliminares, Galileo expuso finalmente su opinión de forma pública en 1615, en su *Carta abierta a la Señora Cristina de Ixyrena, Gran Duquesa de Toscana*, escrita por consejo de algunos amigos clérigos, en parte para salir al paso del rumor malicioso de que era incrédulo, y también para intentar, sin éxito, evitar que las autoridades eclesiásticas cometieran el error fatal de condenar el sistema de Copérnico apoyándose en bases teológicas. Citando la autoridad de San Agustín, Galileo argumentaba que Dios era el autor no sólo de un gran libro, sino de dos, de la naturaleza tanto como de las Escrituras. La verdad debía ser estudiada en ambos, pero con resultados diferentes. El libro de la naturaleza debía ser leído en el lenguaje de la ciencia matemática y los resultados expresados en teoría física; por su parte, las Escrituras no contenían ninguna teoría física, sino que nos revelaban nuestro destino moral. Cuando se referían a los fenómenos naturales, utilizaban el lenguaje del sentido común, según las ideas populares, sin implicar que su sentido literal hubiera de ser tomado como refiriéndose a los hechos físicos. De hecho, señaló que siempre se había aceptado que las Escrituras empleaban lenguaje figurativo en

muchos puntos, como cuando mencionaban el ojo, o la mano, o la ira de Dios, en los que una interpretación literal hubiera sido inmediatamente herética. Era contrario a la razón y a la tradición emplear una interpretación literal de las Escrituras para poner en duda la verdad de afirmaciones que expresaban directamente la evidencia de los sentidos o las conclusiones necesarias a partir de esa evidencia.

Me parece —escribía Galileo en su carta a la gran duquesa— que, al estudiar los problemas de la naturaleza, no debemos partir de la autoridad de los textos de las Escrituras, sino de la experiencia de los sentidos y de las demostraciones necesarias (dalle sensate éxperienze e dalle dismostrazioni necessarie). Porque la Sagrada Escritura y la naturaleza proceden igualmente de la Palabra de Dios, la primera como dictado del Espíritu Santo, la segunda como la ejecutora más obediente de los mandatos de Dios; y además, siendo conveniente en las Escrituras (por modo de condescendencia con la inteligencia de todos los hombres) decir muchas cosas diferentes, en apariencia y en cuanto concierne a la pura significación de las palabras, de la verdad absoluta; pero la naturaleza, por su parte, siendo inexorable e inmutable y no traspasando los límites de las leyes asignadas a ella, como si no se preocupara de si sus razones abstrusas y modo de operación cayeran o no dentro de la capacidad del hombre para entenderlas; es evidente que esas cosas relativas a los efectos naturales, que o la experiencia de nuestros sentidos pone ante nuestros ojos o las demostraciones

necesarias nos prueban, no deben ser puestas en duda por ningún motivo, mucho menos condenadas basándose en los textos de las Escrituras que puedan, por las palabras utilizadas, parecer significar algo distinto. Porque cada expresión de las Escrituras no está ligada a condiciones estrictas como cada hecho de la naturaleza; y Dios no se revela a Sí mismo menos admirablemente en los efectos de la naturaleza que en las palabras sagradas de las Escrituras.

Concluía que, evidentemente, la intención del Espíritu Santo no era enseñarnos Física o Astronomía, o enseñarnos si la Tierra se movía o estaba en reposo. Estas cuestiones eran teológicamente neutrales, aunque, ciertamente, debíamos respetar el texto sagrado y, donde fuera apropiado, utilizar las conclusiones de la Ciencia para descubrir su significado. El propósito del Espíritu Santo en las Escrituras, como lo expresaba agudamente en una observación que atribuía al cardenal Baronio, era enseñarnos «cómo ir al cielo, no cómo van los cielos».

Concedido esto —continuaba—, y siendo verdad, como se ha dicho, que dos verdades no pueden ser contradictorias, la tarea de un intérprete juicioso es intentar penetrar el verdadero sentido de los textos sagrados, que indudablemente estarán de acuerdo con esas conclusiones naturales que el sentido manifiesto y las demostraciones necesarias han hecho antes seguras y ciertas. En verdad, siendo el caso, como se ha dicho, que las Escrituras, por la razón expuesta, admiten en muchos

lugares interpretaciones distintas del sentido de las palabras y, además, no siendo nosotros capaces de afirmar que todos los intérpretes hablan por inspiración divina (porque, si fuera así, entonces no habría entre ellos diferencias respecto de los significados del mismo texto), debo pensar que sería un acto de gran prudencia prohibir a cualquiera usurpar los textos de las Escrituras y que sería como forzarlos el defender esta o aquella conclusión natural como verdad, sobre la cual los sentidos y las razones necesarias y demostrativas pudieran en un momento u otro asegurarnos lo contrario. Porque ¿quién pondrá límites a la inteligencia e inventiva humanas? (E chi vuol por termine alli umani ingegni?) ¿Quién afirmará que todo lo que es perceptible y cognoscible en el mundo está ya descubierto y conocido? Quizá quienes en otras ocasiones confiesan (y con gran verdad) que ea quae scimus sunt mínima pars earum quae ignoramus [las cosas que conocemos son una mínima parte de las que ignoramos]. En verdad, si sabemos de boca del mismo Espíritu Santo que Deus tradidit mundum disputationi eorum, ut non invernalis homo o pus quod operatus est Deus ab initio ad finem [Dios entregó el mundo a sus discusiones, para que el hombre no halle la obra que realizó Dios desde el principio al final — Eclesiastés, 3, 11], no debemos, como creo, contradiciendo esa sentencia, detener el movimiento del libre filosofar sobre las cosas del mundo y de la naturaleza, como si estuvieran ya todas encontradas con certeza y conocidas claramente.

Galileo, hombre de mundo a la vez que católico convencido y filósofo profesional de la naturaleza, invitado estimado en las mesas aristocráticas por su genial inteligencia y su conversación ingeniosa, conocía bien el peso que las decisiones políticas, tanto eclesiásticas como seculares, adjudicaban, por su naturaleza, a la conveniencia y a la paz administrativa. Con una visión profética de sus dificultades futuras, señaló específicamente la distinción entre las condiciones de un cambio de opiniones legales o comerciales y el de la opinión científica³⁷.

Rogaría a esos sabios y prudentes Padres que consideraran con toda diligencia la diferencia que existe entre el conocimiento demostrativo y el conocimiento opinable; con el fin de que, sopesando bien en sus mentes con qué fuerza las conclusiones necesarias impelen a la aceptación, se aseguren lo mejor posible de que no está en la mano de quien profesa las ciencias demostrativas cambiar sus opiniones a placer y aplicarlas ahora de una manera y luego de otra; que hay una gran diferencia entre dar órdenes a un matemático o a un filósofo y darlas a un mercader o a un abogado; y que las conclusiones demostradas relativas a las cosas de la naturaleza y de los cielos no pueden cambiarse con la misma facilidad como las opiniones sobre lo que es legal o no en un contrato, alquiler o letra de cambio.

Galileo creyó, basándose en las observaciones y en la nueva dinámica, que sería posible demostrar que el sistema heliocéntrico era una conclusión necesaria de los datos. Había visto con su

telescopio un modelo del sistema solar en Júpiter y sus satélites, y había medido la gran variación anual de los diámetros aparentes de Venus y Marte. Sus observaciones de las fases de Venus habían confirmado, hasta donde él había llegado, la predicción del sistema copernicano de que los planetas interiores, y ellos solos, mostrarían fases completas, como la Luna, cuando eran observados desde la Tierra (cf. figura 6). Decía que había «muchas otras observaciones sensibles que no pueden de ninguna manera ser reconciliadas con el sistema ptolemaico, sino que son los argumentos más fuertes en favor del sistema copernicano». Había algunas proposiciones naturales que la ciencia y la razón humanas podían solamente presentarnos más como «alguna opinión probable y alguna conjetura plausible que como un conocimiento cierto y demostrado». Pero «hay otras, de las que o tenemos o podemos confiadamente creer que es posible obtener, por experimentos, observaciones prolongadas y demostraciones necesarias, una certeza indudable; como, por ejemplo, si la Tierra o el Sol se mueve o no, y si la Tierra es esférica o de otra forma».

Si la teoría copernicana, o la opinión concreta de la movilidad de la Tierra, fue prohibida y declarada contraria a la fe católica sin prohibir la Astronomía como un todo, el que Galileo continuara con su ardorosa defensa no podía sino provocar gran escándalo. Sólo podía ser en detrimento de las almas «el darles ocasión de ver una proposición demostrada que podía después llegar a ser pecado el creerla. ¿Y cuál otra cosa podría ser la prohibición de toda la Ciencia, sino un abierto desprecio de un centenar de textos de las

Sagradas Escrituras, en los que se nos enseña que la gloria y la grandeza de Dios omnipotente son admirablemente discernidas en todas sus obras y leídas divinamente en el libro abierto del firmamento?» Sería contradecir toda la evidencia de la intención de Dios al dotar al hombre con su admirable inteligencia y su razón investigadora. Galileo alertó a los teólogos contra el peligro de poner al creyente en la embarazosa situación de tener que creer como verdad lo que sus sentidos y las demostraciones científicas podrían demostrarle que era falso, o de cometer un pecado si creía lo que su razón le demostraba ser cierto. 'Además, señaló que incluso el sistema geostático no concordaba con el sentido literal de la Escritura. Por ejemplo, si el mandato de Josué al Sol se tomaba literalmente, según este sistema, él debía haberse dirigido al Primer Motor, porque al detener solamente al Sol y la Luna hubiera trastocado todo el sistema celeste, y no hay prueba de que ocurriera eso. La asociación de la cosmología aristotélica y de la astronomía ptolemaica con el lenguaje de la Teología no era únicamente accidental, sino que estaba lejos de ser completa.

Galileo escribió con el lenguaje del realismo científico intransigente. Creía en un mundo objetivo de ley inmutable que existía independientemente de las invenciones de los hombres, un mundo verdadero, que la Ciencia tenía por tarea descubrir, ciertamente, por medio de sutiles razonamientos teóricos, pero, sin embargo, con certeza. «Nada cambia en la naturaleza para acomodarse a la comprensión o a los movimientos de los hombres», escribía a su amigo Elia Diodati en 1633. Al intentar un acercamiento

matemático al mundo natural, estaba de acuerdo con los «físicos» medievales más que con los «matemáticos» en la Astronomía, y no se contentaba con detenerse simplemente en «salvar las apariencias». Como Tomás de Aquino, presuponia una teoría física verdadera, una sustancia física real que causaba los fenómenos (cf. vol. I, pp. 82-83). Pero si el mundo real físico era una estructura abstracta de las «cualidades primarias» matemáticas reales y de sus leyes, cualidades que determinaban la naturaleza de la sustancia física, entonces el sistema de teorías que exponía esas leyes debía ser formulado necesariamente de forma consistente en todo el ámbito de los fenómenos físicos, según principios matemáticos uniformes. Era precisamente la discontinuidad en la ciencia del movimiento de su época, por ejemplo, entre la astronomía de Ptolomeo y la cosmología aristotélica y entre los tipos de movimiento distintos cualitativamente en esta última, lo que Galileo encontraba tan poco satisfactorio. Era completamente cierto, como decía Salviati en el Tercer Día de *Dos sistemas principales* que «el objetivo principal de los astrónomos puros es dar razones solamente para las apariencias en los cuerpos celestes, y adaptar a éstos y al movimiento de las estrellas, estructuras y composiciones de círculos tales que los movimientos que se siguen de esos cálculos correspondan a las mismas apariencias, teniendo pocos escrúpulos en admitir anomalías que podrían de hecho demostrarse turbadoras por otros conceptos». Sin embargo, una crítica que hizo al sistema ptolemaico era precisamente que «aunque satisfacía a un astrónomo meramente matemático (*puro calcolatore*), no satisfacía empero ni

contentaba al astrónomo filósofo», esto es, a quien era también un científico de la naturaleza. Pero, añadía, Copérnico «había entendido bien que si se podían salvar las apariencias celestes con hipótesis falsas en la naturaleza, eso podía hacerse mucho más fácilmente con hipótesis verdaderas».

La característica de la filosofía de la ciencia de Galileo, que acabó dominando su posición en la controversia sobre la teoría copernicana, era la forma peculiar de su convicción de que su nueva ciencia matemática era un método de leer el libro real de la naturaleza. Era su creencia que las «proposiciones naturales» podían ser «demostradas necesariamente», que la verificación experimental de una teoría podía establecerla con «certeza indudable». En *Dos nuevas ciencias* decía, describiendo el inicio de una investigación por medio de una «suposición hipotética», que ésta podía ser aceptada condicionalmente «como un postulado, cuya verdad absoluta sería establecida cuando encontráramos que las inferencias a partir de ella corresponden y concuerdan con el experimento». Utilizó ese lenguaje no sólo cuando estableció la ley cinemática de la caída libre como un hecho, sino también al hablar de la teoría copernicana. Así, cuando repetía su argumento de que ésta era más económica que la teoría ptolemaica, no lo estaba empleando en un sentido convencional. Era la misma naturaleza la que «no hace por medio de muchas cosas lo que puede ser hecho por pocas», como decía en el Segundo Día de su *Dos sistemas principales*.

La contribución fundamental de Galileo al debate cosmológico fue el

darse cuenta de que en la nueva dinámica inercial existía un criterio físico nuevo y preciso, tal como se había venido aceptando como apropiado para decidir, en Astronomía, entre teorías matemáticas opuestas (*vide* vol. I, pp. 85 y ss.), aunque en apariencia no lo distinguió claramente de la convicción de que la verificación irrefutable era posible en la Ciencia. Tratando todo movimiento, lo mismo celeste que terrestre, como explicable por un único sistema de Dinámica, quería reunir en este sistema la explicación y los medios de predicción de los distintos movimientos. Vio en la ley de la inercia la posibilidad de una teoría superior con la que era incompatible la teoría geocéntrica y solamente compatible la heliocéntrica. Fracasó en su propio intento de emplear este criterio dinámico, porque no fue capaz de generalizar completamente la ley de la inercia, ni de apreciar la verdadera geometría del sistema heliocéntrico tal como fue establecida por Kepler, pero fue este criterio el que condujo finalmente a la decisión.

Sin embargo, en 1615 Galileo no había comenzado todavía a subrayar el argumento dinámico en favor de la teoría copernicana, y fue más bien la dificultad de establecer verdades necesarias acerca de las realidades de la experiencia en cualquier caso concreto en lo que apoyó su réplica el principal actor de la parte eclesiástica en el debate. Fue éste el cardenal Bellarmino (1542-1621). Bellarmino, que había sido en su juventud estudiante de Astronomía, tuvo que asumir la ingrata tarea de tomar la decisión que llevó a Giordano Bruno a la muerte en la hoguera en 1600³⁸.

Sin duda, su política respecto de Galileo estuvo basada en la

determinación de no dejar que ese episodio se repitiera. Tenía ya más de sesenta años y pretendía la paz administrativa, y su método de conseguirla fue tomar un camino distinto al de Galileo para evitar el conflicto entre la Astronomía y las Escrituras. Su política fue debilitar las conclusiones de la ciencia de la naturaleza y aceptar la nueva astronomía como no establecida en ningún sentido con «certeza indudable», sino solamente como «opinión probable y conjetura plausible»; aceptarla solamente en una forma que dejara intacta la interpretación literal de las Escrituras y la cosmología aristotélica que el azar histórico había unido en matrimonio a ella. Cerró sus ojos a los aspectos en los que la unión era menos un matrimonio que un adulterio. Sin embargo, aunque primordialmente administrativos en sus objetivos y limitados en sus aplicaciones, no se puede negar que los argumentos de Bellarmino tuvieron éxito al ganar un punto filosófico contra Galileo. Sus dos filosofías representan una polarización clásica de opuestos, una antítesis en la manera de concebir los descubrimientos y las invenciones de la ciencia teórica, que es a la vez antigua, persistente y fácilmente no entendida.

Los lógicos escolásticos habían conocido bien el principio de que los fenómenos no pueden unívocamente determinar las hipótesis que deben «salvarlos», o explicarlos, cuando las mismas conclusiones pueden ser deducidas de premisas diferentes; afirmar que la concordancia con la observación probaba una hipótesis como verdadera era cometer la falacia de «afirmar el consiguiente». Este principio, desarrollado en Oxford en los siglos XIII y XIV, había sido

un lugar común de la escuela lógica de Padua a principios del siglo XVI (cf. *supra*, pp. 32 y ss.). Una forma típica de expresarlo es la de Agostino Nifo. En su comentario a la *Física* de Aristóteles, Nifo había distinguido entre el proceso lógico del descubrimiento y el de la demostración, y había comparado la certeza de la Matemática, donde las premisas y las conclusiones eran recíprocas, con el carácter conjetural de nuestro conocimiento de las causas en la ciencia de la naturaleza³⁹. Al considerar las hipótesis astronómicas, Nifo escribía en su *De Caelo et Mundo Commentaria*, editado en Venecia en 1553, en el libro 2:

En una buena demostración, el efecto se sigue necesariamente de la causa supuesta, y ésta debe ser supuesta necesariamente en vistas al efecto observado. Ahora bien, admitiendo las excéntricas y epiciclos, es verdad que se salvan las apariencias. Pero la recíproca de ésta no es necesariamente verdadera, a saber, que, dadas las apariencias, las excéntricas y epiciclos deben existir. Esto es verdad sólo provisionalmente, hasta que sea descubierta una explicación mejor que, a la vez, haga necesario al fenómeno y sea hecha necesaria por él. Según estos hombres, se equivocan quienes, tomando un fenómeno natural, cuya ocurrencia podría provenir de muchas causas, concluyen en favor de una de ellas.

La ocasión que llevó a Bellarmino a utilizar esta doctrina lógica, para quitar mordiente a los argumentos de Galileo en favor de la nueva astronomía, fue una carta escrita por un compatriota de

Galileo, el fraile carmelita Paolo Antonio Foscarini, que había seguido a Galileo al sugerir que el sistema copernicano debía ser considerado como una verdad física, y no como un mero artificio de cálculo, y que había mostrado cómo los pasajes importantes de las Escrituras podían ser conciliados con él. La réplica de Bellarmino, escrita también en 1615, rechazaba la propuesta de Foscarini.

Me parece —escribía— que su reverencia y el señor Galileo actúan prudentemente cuando se contentan hablando hipotéticamente (ex suppositione) y no absolutamente, como siempre he entendido que habló Copérnico. Decir que con la hipótesis del movimiento de la Tierra y el reposo del Sol se explican todas las apariencias celestiales mejor que con la teoría de las excéntricas y epiciclos [!], es hablar con excelente buen sentido y no correr ningún riesgo. Esa manera de hablar es suficiente para un matemático. Pero querer afirmar que el Sol está, en realidad, en el centro del universo y que solamente gira sobre su eje sin ir de Este a Oeste, y que la Tierra está en el tercer cielo [i. e. esfera] y gira con la mayor velocidad alrededor del Sol, es una actitud muy peligrosa y apta no sólo para excitar a todos los filósofos y teólogos escolásticos, sino también para injuriar nuestra santa fe al contradecir a las Escrituras. Su reverencia ha demostrado claramente que hay varias formas de interpretar la Palabra de Dios, pero no ha aplicado estos métodos a ningún pasaje concreto; y si usted deseara exponer por el método de su elección todos los textos que ha citado, estoy seguro que habría encontrado muy graves dificultades.

Como sabe, el Concilio de Trento prohíbe la interpretación de las Escrituras en una forma contraria a la opinión común de los Santos Padres... No valdría decir que esto no es una cuestión de fe, porque, aunque puede no ser una materia de fe ex parte objecti o en cuanto concierne al tema tratado, es, sin embargo, una materia de fe ex parte dicentis, en cuanto concierne a quien la enuncia... Si hubiera una prueba real de que el Sol está en el centro del universo, de que la Tierra está en el tercer cielo y de que el Sol no gira alrededor de la Tierra, sino la Tierra alrededor del Sol, entonces deberíamos proceder con la mayor circunspección al explicar pasajes de la Escritura que parecen enseñar lo contrario, y admitir más bien que no los entendemos que declarar que una opinión que se ha demostrado que es verdadera es falsa. Pero, por lo que a mí concierne, no creeré que existen tales pruebas hasta que me sean demostradas. Ni es una prueba el que, si se supone que el Sol está en el centro del universo y la Tierra en el tercer cielo, se salve así las apariencias, pues ello no equivale a una prueba de que el Sol, efectivamente, está en el centro y la Tierra en el tercer cielo. La primera clase de prueba podría, creo, ser hallada; pero por lo que respecta a la segunda, tengo las mayores dudas; y en caso de duda, no debemos abandonar la interpretación del texto sagrado tal como es presentado por los Santos Padres.

Evidentemente, Bellarmino no había dominado los detalles técnicos del *De Revolutionibus*, pero había leído el cauto prefacio de

Osiander. El sistema copernicano debía ser tratado solamente como una hipótesis matemática para hacer cálculos; se había utilizado como tal en la elaboración del calendario gregoriano de 1582. Las ideas de Galileo sobre la interpretación de las Escrituras, explícitamente una exposición de las doctrinas de San Agustín y de los Santos Padres, fueron en sí mismas bien recibidas en Roma. La única cuestión era la prudencia de un laico que se ponía a enseñar a los teólogos su oficio. Pero fue la estrategia filosófica de Bellarmino, la estrategia de Osiander, pastor luterano, la que prevaleció en las deliberaciones de la Congregación del Santo Oficio, ante la que había llegado el asunto copernicano. Sin duda, las autoridades romanas estaban preocupadas en parte por salvaguardar el texto de las Sagradas Escrituras contra interpretaciones personales, según el modelo protestante, para las que no parecía haber límite. En todo caso, jugaron a lo seguro. La intervención personal de Galileo en Roma no convenció a nadie de que la teoría copernicana era físicamente verdadera, aunque fue útil para limpiarle personalmente de una sospecha de herejía y blasfemia, completamente infundada y de inspiración maliciosa. El 24 de febrero de 1616 los expertos en Teología, o cualificadores, del Santo Oficio dieron su famoso informe. Exponían que la proposición de que «el Sol es el centro del mundo y está completamente desprovisto de movimiento local» era «filosóficamente necia y absurda, y formalmente herética, en cuanto contradice expresamente la doctrina de las Sagradas Escrituras en muchos lugares, tanto según su significado literal como según la exposición

y significado de los Santos Padres y Doctores» y que la proposición de que «la Tierra no es el centro del mundo ni inmóvil, sino que se mueve como un todo, y también con movimiento diario», era digna de «recibir la misma censura en Filosofía, y por lo que concernía a la verdad teológica, ser por lo menos errónea en la fe».

El 5 de marzo la Congregación del Índice publicó su decreto prohibiendo el *De Revolutionibus* de Copérnico hasta que hubiera sido corregido. Debido en parte a la intervención del cardenal Maffeo Barberini, el futuro Papa Urbano VIII, la Congregación hizo una distinción entre la hipótesis científica y la interpretación teológica y rehusó prohibir absolutamente el *De Revolutionibus*. Las «correcciones» se limitaban a cambios muy pequeños, pero que ponían en claro que presentaba solamente una hipótesis. En 1620 se volvió a permitir leer el libro. Además, la prohibición no fue publicada de manera tal que la teoría copernicana fuera formalmente herética, aunque muchos contemporáneos, ignorantes de los matices de la distinción, creyeron comprensiblemente que lo era. El libro de Foscarini sobre la interpretación de las Escrituras fue, al mismo tiempo, totalmente prohibido. Galileo no era mencionado explícitamente, aunque era, en realidad, el personaje central del drama y la víctima principal. Honrado ante todo, no había ahorrado nada en su defensa de la nueva astronomía durante todo ese invierno romano. «Tenemos aquí al señor Galileo, que con frecuencia, en reuniones de hombres de inteligencia curiosa, deja atónitos a muchos sobre la opinión de Copérnico, que él defiende como verdadera», escribía cortésmente un cierto monseñor

Querengo (en una carta incluida en la edición nacional de las *Obras* de Galileo, publicada en Florencia).

Discursea a menudo entre 15 ó 20 invitados que le asaltan ardorosamente, ahora en una casa, luego en otra. Pero está tan bien afianzado que se ríe de ellos; y aunque la novedad de su opinión deja sin convencer a la gente, demuestra la vanidad de la mayor parte de los argumentos con que sus oponentes tratan de vencerle. El lunes, especialmente en casa de Federico Ghisilieri, realizó proezas admirables; y lo que más me agradó fue que, antes de responder a las razones opuestas, las amplió y las fortaleció él mismo con nuevas bases que parecían invencibles, de forma que, al demolerlas a continuación, hizo que sus oponentes parecieran mucho más ridiculizados.

Ciertamente, el simple hecho de las personalidades tuvo una gran influencia en este drama, en el que se ha gastado tanta tinta filosófica. Después del decreto, Querengo escribía nuevamente, expresando la opinión de un hombre de mundo imparcial.

Las disputas del señor Galileo se han disuelto en humo alquímico, desde que el Santo Oficio ha declarado que mantener esta opinión es disentir manifiestamente de los dogmas infalibles de la Iglesia. De manera que aquí estamos, por fin, a salvo de nuevo en una Tierra sólida, y no tenemos que volar con ella como hormigas que se arrastran sobre un balón.

Existen dos documentos que pretenden describir lo que se dijo a Galileo después de que la Congregación del Santo Oficio llegó a su

decisión. Según un certificado entregado a él por Bellarmino, simplemente se le notificaba el decreto que declaraba que las tesis copernicanas eran contrarias a las Escrituras y, «por consiguiente, no debían ser sostenidas ni defendidas». Pero según una minuta, posiblemente falsa, inserta en el informe de la Inquisición sobre el proceso, Galileo fue advertido por Bellarmino «del error de la opinión antedicha y conminado a abandonarla; e inmediatamente después» se le ordenó por el comisario general del Santo Oficio, en presencia de Bellarmino y otros testigos, «en el nombre de Su Santidad el Papa y de toda la Congregación del Santo Oficio, abandonar completamente la dicha opinión de que el Sol es el centro del mundo e inmóvil y que la Tierra se mueve; no sostenerla más, enseñarla o defenderla de cualquier manera que fuese, verbal o escrita; de otra forma, el Santo Oficio tomaría autos contra él; requerimiento al que el dicho Galileo se sometió y prometió obedecer». Las diferencias entre estas dos versiones iba a materializarse en el juicio de Galileo en 1633.

Galileo esperó una oportunidad para probar una opinión de la que poseía buenas razones, aunque no concluyentes, para afirmar que era verdadera. Se presentó ésta con la elección en 1623, como Papa Urbano VIII, de Maffeo Barberini, florentino, amigo de las artes y miembro, como Galileo, de la Academia dei Lincei. Galileo había acabado con todos los argumentos propuestos *en contra* del movimiento de la Tierra. Además, llegó a la conclusión de que solamente suponiendo el doble movimiento de la Tierra, sobre su eje y alrededor del Sol, era posible explicar el flujo y reflujo de las

mareas. No creyendo en la acción a distancia, no aceptaba la teoría de la gravitación de Kepler. En su lugar, propuso una explicación basada en la conservación del momento del mar. Su propósito era mostrar que los movimientos de las mareas podían ser demostrados a partir de la hipótesis de las revoluciones diaria y anual de la Tierra, y que la existencia de estas revoluciones era demostrada por la existencia de las mareas. Fue esta prueba dinámica capital la que finalmente formó la culminación del diálogo sobre los *Dos sistemas principales del mundo* (1623), en el Cuarto Día, al cual conducía toda la discusión dinámica anterior. No convenció mucho a los contemporáneos de Galileo, y únicamente gracias a la obra posterior de Huygens y Newton fue posible llegar al fondo del asunto y ver la falacia del ingenioso argumento de Galileo.

Las esperanzas de Galileo de que se volviera a abrir la cuestión copernicana no se cumplieron. Urbano VIII estuvo de acuerdo en que publicara un estudio más sobre el tema, con la sola condición de que debía ser hipotético. El punto de vista de Galileo puede apreciarse por el discurso del final del *Diálogo*, en el que Galileo ponía en boca de Simplicio las opiniones con las que el Papa le había aleccionado que acabara. Al tratar la afirmación de que era posible demostrar concluyentemente el movimiento de la Tierra, Simplicio preguntaba si Dios, con su poder y sabiduría infinitos, no podría haber provocado las mareas por algún otro medio que el considerado por Galileo. «Teniendo siempre ante los ojos de mi mente una doctrina más sólida que escuché una vez de una persona eminente y culta, y ante la cual uno debe quedar en silencio... —

declaraba—, sé que replicarías que El podría haber conocido cómo hacerlo de muchas maneras, que están más allá de la comprensión de nuestra mente. De lo que concluyo en seguida que, siendo esto así, sería una audacia extravagante que alguien limitara y confinara el poder y la sabiduría divinos a una fantasía particular (*fantasía particulare*) de su propia invención.» Salviati responde: «Una doctrina admirable y verdaderamente angélica, y que concuerda bien con otra, también divina, que, mientras que nos concede el derecho de argüir sobre la constitución del universo (quizá para que no sea restringida la actividad de la mente humana o se haga perezosa), añade que no podemos descubrir la obra de sus manos.» El argumento, basado en la omnipotencia de Dios, que había sido utilizado para liberar a la ciencia de la naturaleza de las restricciones del aristotelismo en el siglo XIII, se manifestaba como un boomerang⁴⁰. El punto de vista de Galileo era que, mientras este argumento era indudablemente cierto, él estaba interesado en descubrir el modo por el que Dios había actuado *realmente* al crear el mundo.

De esa forma, si tenía que publicar una demostración de la teoría copernicana completa sin ir directamente contra la autoridad eclesiástica, era imposible para Galileo el evitar algunos subterfugios. La orden general contenida en el decreto de 1616 todavía tenía valor. Fue este error de cálculo del riesgo lo que le llevó al desastre, aunque puede argüirse justamente que esto no justificaba de ninguna manera la acción que se emprendió contra él. Tomó todas las precauciones, ayudado por sus amigos, el maestro

del Sacro Palacio, el oficial jefe encargado de las autorizaciones y el propio secretario del Papa, para asegurarse de que el *Diálogo* aparecería con todas las censuras oficiales apropiadas. Recibió el *imprimatur* del arzobispo de Florencia, aunque parece que hubo alguna auténtica confusión entre las distintas autoridades, todas ellas bien dispuestas. Siguiendo las instrucciones del Papa, Galileo había añadido un prefacio y una conclusión declarando que sus argumentos no eran más que probables e hipotéticos. Pero como todo el peso de la discusión en las páginas entre el prefacio y la conclusión tenían la intención completamente opuesta, se hacía más obvia la hipocresía del declarante. Urbano VIII, con cierta razón, acusó a Galileo de haber roto una promesa personal hecha a él. Entonces la Inquisición romana le acusó de desobedecer la admonición registrada en la minuta de 1616 y de pretender presentar la opinión condenada «como una hipótesis» (*hypothetice*). Galileo negó vigorosamente todo conocimiento de la admonición. Después de procesos que fueron todo menos leales, fue declarado culpable; tres de los 10 cardenales que le juzgaron se negaron a firmar; y el 22 de junio de 1635, en el convento dominicano de Santa María Sopra Minerva, fue obligado a abjurar de su creencia en las tesis copernicanas condenadas. El *Diálogo* fue prohibido. La primera aparición de la frase famosa *Eppur si muove* parece haber sido en la inscripción de un retrato de Galileo pintado el año de su muerte. No es probable que, después de una sumisión tan completamente humillante, murmurase esas palabras al incorporarse tras estar de rodillas. En cuanto a su tratamiento físico

durante el juicio, todas las pruebas muestran que lo más que sufrió fue confinamiento en una residencia confortable. Era un inconveniente mucho más serio el haber sido desterrado por el resto de su vida a su granja en Arcetri, en las colinas, al Sur, que dominan la ciudad de Florencia.

Su sufrimiento real fue de otro tipo. La experiencia había enseñado a Galileo a distinguir entre la verdad y el comportamiento de los que dicen servirla. Pero era casi insoportable sufrir humillación de manos de las autoridades de la Iglesia en cuyas doctrinas creía y a la que deseaba servir. El triunfo de la «ignorancia, impiedad, fraude y engaño», como describió el juicio más tarde, era tan innecesario como nefasta fue la conclusión para las inteligentes investigaciones de los filósofos cristianos de la Ciencia.

El decreto contra las tesis copernicanas y la condenación de Galileo colocaron a los católicos en una posición discordante durante más de un siglo, sin que eso impidiera que se realizara un trabajo excelente de astronomía práctica en Italia y otros países católicos y el desarrollo libre de otras ciencias. El propio Galileo, aunque ya era viejo, siguió con su trabajo sobre Mecánica y acabó lo que fue realmente su más importante contribución al tema, sus *Discursos sobre dos nuevas ciencias*. Pero los hizo publicar en Holanda en 1638. Incluso se prosiguió un trabajo excelente de astronomía teórica bajo la fachada de equívocos ingeniosos. Por ejemplo, Alfonso Borelli, en 1660, observó la letra del decreto limitando a Júpiter y sus satélites la sugestiva teoría de la mecánica celeste que obviamente pretendía aplicar a la Tierra y la Luna. Otro resultado

curioso del decreto fue la edición de los *Principia* de Newton, publicada en 1739-1742, con un comentario por los padres mínimos Le Seur y Jacquier presentando el sistema newtoniano del mundo «hipotéticamente»; los *Principia* habían sido anunciados originalmente en las *Philosophical Transactions of the Royal Society* como una demostración matemática del sistema copernicano. Es verdad que la atmósfera era embarazosa para el «filosofar libremente acerca del mundo y la naturaleza» que Galileo había defendido denodadamente que permaneciera abierto. Richelieu instigó un intento para hacer que las tesis copernicanas fueran condenadas en la Sorbona, pero sin éxito; se decidió que la cuestión era un problema filosófico y no de autoridad. Fue al oír la condenación de Galileo cuando Descartes, que era ya un filósofo nervioso y vivía en Holanda, adoptó explícitamente su estrategia de disimulo en Filosofía y se convirtió, en frase de Máxime Leroy, en *philosophe au masque*. En noviembre de 1633 escribía alarmado a Mersenne, que estaba preparando la adición de *Le Monde*, pidiéndole noticias del asunto de la teoría copernicana: «y confieso que si es falsa, entonces lo son todos los fundamentos de mi filosofía, porque ella se demuestra a partir de ellos, sin ninguna duda». Cuando descubrió lo que había sucedido, envió más cartas a Mersenne para que retirara de la publicación *Le Monde*, escribiendo en abril de 1634:

Sin duda, sabe que Galileo ha sido arrestado, hace poco tiempo, por los Inquisidores de la Fe y que su opinión respecto del movimiento de la Tierra ha sido condenada como herética. Ahora me gustaría señalarle que todas las cosas que explico en

mi tratado, entre las que se encontraba esta opinión sobre el movimiento de la Tierra, dependen tanto unas de las otras que es suficiente saber que una de ellas es falsa, para percibir que todas las razones que yo utilicé son inválidas; y aunque pienso que estaban basadas en demostraciones ciertas y evidentes, no desearía por nada en el mundo mantenerlas contra la autoridad de la Iglesia. Sé bien que se podría decir que todo 'o que los inquisidores de Roma han decidido no se convierte por ello en artículo inmediato de fe, y que para ello primero sería necesario que fuera aceptado por el Concilio. Pero no estoy tan apegado a mis pensamientos para querer hacer uso de esas cualificaciones para seguir manteniéndolos; y quiero poder vivir en paz y continuar la vida que he emprendido al tomar como mi máxima: bene vixit, bene qui latuit [vive bien quien se esconde], aceptando el hecho de que soy más feliz de verme libre del temor de que, a través de mi libro, podría conocerse más de lo que deseo, que apenado por el tiempo y dificultades que he pasado para escribirlo... He leído la noticia de la condenación de Galileo, impresa en Lieja el 20 de septiembre de 1633, en la que aparecen estas palabras: quamvis bypothetice a se illam proponi simularet [aunque pretendía que era propuesto por él hipotéticamente], de forma que ellos parecen incluso prohibir el empleo de esta hipótesis en la Astronomía; ... no habiendo visto en ninguna parte que esta censura haya sido autorizada por el Papa o por el Concilio, sino solamente por una Congregación particular de cardenales inquisidores, no pierdo toda esperanza

de que sucederá con ella como con las Antípodas, que fueron más o menos condenadas en un tiempo, y de ese modo que mi Monde será capaz de ver la luz del día en el transcurso del tiempo; en ese caso, tendré que usar mi ingenio.

Cuando Descartes publicó finalmente su cosmología en los *Principia Philosophiae* en 1644, fue bajo capa de presentar sus teorías físicas como ficciones (*vide infra*, p. 282). «Quiero que lo que he escrito sea tomado meramente como una hipótesis —escribía—, que quizá está muy alejada de la verdad.» Con la definición que había elaborado del movimiento como *simple* translación de la proximidad de un conjunto de cuerpos a la proximidad de otro conjunto, fue capaz de suponer que todo movimiento era completamente relativo, pudiendo escogerse cualquier conjunto de cuerpos arbitrariamente como siendo el punto de referencia en reposo. Esto le permitió declarar formalmente que la Tierra podía ser considerada en reposo. El convencionalismo y la ficción introducidos en la Física por el decreto anticopernicano había permeado profundamente el alma de Descartes, y le valió la polémica con Newton. El decreto y el ambiente teológico en que había sido publicado tuvo mayor responsabilidad en los aspectos más «positivistas» del pensamiento del siglo XVII de lo que a veces puede creerse (cf. *infra*, pp. 275 y ss.).

Descartes había visto el punto importante de que sin la ratificación papal las tesis copernicanas no habían sido declaradas formalmente contrarias a la fe y heréticas. Gassendi señaló lo mismo. El mismo

comisionado general, Vincenzo Maculano da Firenzuola, que había dirigido el proceso contra Galileo, admitió al discípulo y amigo de Galileo, el benedictino Benedetto Castelli, que las cuestiones astronómicas no podían ser decididas por las Escrituras, que se preocupaban solamente de los asuntos relativos a la salvación. En las décadas que siguieron, un cierto número de autores jesuitas señalaron lo mismo que Descartes y Gassendi. Por ejemplo, el jesuita francés Honoré Fabri, escribiendo en 1661 en defensa del pasaje geocéntrico de las Escrituras, añadía que si se encontraran razones concluyentes no dudaba que la Iglesia diría que debían ser entendidas «figuradamente». No fue hasta 1757 cuando el Papa Benedicto XIV anuló el decreto anticopernicano. En fin, en 1893 el Papa León XIII hizo la *amende honorable* a la memoria de Galileo, basando su encíclica *Providentissimus Deus* en los principios de la exégesis que Galileo había expuesto, y rechazaba el fundamentalismo de Bellarmino y de los calificadores del Santo Oficio.

Sin declararse vencido, Pierre Duhem en 1908 hacía su famosa declaración, en su *Essai sur la notion de théorie physique de Platón á Galilée* (*Annales de philosophie chrétienne*, 1908, vol. VI, pp. 584-585), de que los progresos más recientes de la Física habían demostrado que «la lógica estaba de parte de Osiander, Bellarmino y Urbano VIII y no de la de Kepler y Galileo; que los primeros habían captado el exacto significado del método experimental, mientras que los segundos se habían equivocado...» «Suponed que las hipótesis de Copérnico fueran capaces de explicar todas las apariencias

conocidas, lo que se puede concluir es que ellas podían ser Verdaderas, no que son necesariamente verdaderas, porque para legitimar esta última conclusión se debería demostrar que no podía imaginarse ningún otro sistema de hipótesis que pudiera explicar las apariencias con la misma bondad; y esta última prueba no se ha diado nunca.»

Duhem estaba señalando el aspecto válido, desarrollado entera-» mente en su libro *La Théorie Physique: son object, sa structure* (1914), de que el experimento no puede nunca *establecer* una teoría irrefutablemente. Pero al introducir el criterio dinámico para elegir entre dos teorías igualmente adecuadas para «salvar las apariencias» de los cielos, Galileo estaba de hecho introduciendo una comprobación de una teoría por su alcance de aplicabilidad, como vio efectivamente Duhem. Gracias a esa comprobación se puede decir que Galileo y Kepler mostraron cómo proceder para *refutar* una teoría astronómica y que de hecho fue Newton quien refutó la hipótesis geocéntrica⁴¹. De esta forma, la invalidación experimental del consiguiente podía hacer necesario el *negar* el antecedente, incluso aunque su verificación no permitiera que el antecedente fuera afirmado. Dejando de lado la interpretación errónea de Duhem acerca de la aplicación muy restringida, por parte de Bellarmino, a solamente las teorías astronómicas de la interpretación «positivista» de la ciencia abogada por Duhem mismo, la opinión de que las dos teorías rivales eran meramente artificios alternativos de cálculo no sobrevivió en verdad a la comprobación de Galileo.

J. H. Newman, el futuro cardenal, al estudiar esta controversia en 1844, escribió en sus *Sermons chiefly on the Theory of Religious Belief*: «Si nuestro sentido del movimiento no fuera más que un resultado accidental de nuestros sentidos actuales, ninguna de las dos proposiciones es verdadera y las dos son verdaderas, ninguna de las dos verdaderas filosóficamente, las dos verdaderas para ciertos propú* sitos prácticos en el sistema en el que se encuentran respectivamente.» Newman no estaba por supuesto intentando hacer una revolución en la Lógica, sino tratando una dificultad en una controversia teológica; pero una observación similar es hecha en ocasiones por los que dicen que el principio de Eínstein de la relatividad generalizada ha privado de sentido el problema de Galileo, porque el movimiento y el reposo solamente pueden ser definidos por referencia a un patrón convencional, de manera que es igualmente legítimo tomar una Tierra estática o un Sol estático como cuadro de referencia. Pero para la relatividad generalizada tiene precisamente tanto sentido decir que la Tierra gira como tenía para Galileo y Newton. Tomando un ejemplo medieval, se puede decir que gira de la misma forma que gira una piedra de molino: gira con referencia a todos los sistemas locales inertes. Era en este sentido en el que el movimiento de la Tierra se ponía en cuestión. Una interpretación sofisticada de la Ciencia se enfrenta inevitablemente con el hecho de que el análisis científico teórico puede hacer descubrimientos físicos genuinos, incluso a pesar de la afirmación de Galileo de que una teoría verificada empíricamente según sus principios es una verdad «necesaria» deba ser

considerada como una prueba de que él mismo estaba aprisionado por un modelo físico euclidiano demasiado simple.

2.3. La fisiología y el método de experimentación y medida

La fisiología experimental fue otra rama de la Ciencia en la que el enfoque cuantitativo, que Galileo utilizó con tanto éxito en la Mecánica y que iba a conseguir triunfos tan asombrosos en la Astronomía, se empleó con grandes resultados en el siglo XVII.

El mismo Galileo había mostrado, cuando estudiaba la fuerza de cohesión de los materiales, que mientras el peso aumentaba como el cubo, el área de la sección transversal, de la que dependía la fuerza, aumentaba solamente como el cuadrado de las dimensiones lineales. Había así un límite definido para el tamaño de un animal terrestre que sus miembros podían soportar y sus músculos mover, pero los animales que vivían en el agua, que soportaba el peso, podían alcanzar dimensiones enormes.

Uno de los primeros en aplicar los métodos de Galileo a los problemas fisiológicos fue su colega el profesor de medicina de Padua Santorio Santorio (1561-1636). Este describió un cierto número de instrumentos como el pulsilogium, o pequeño péndulo para medir la velocidad del pulso, y un termómetro clínico. Utilizó este último para estimar el calor del corazón de un paciente midiendo el calor del aire espirado, que se suponía venía del corazón. Diseñó también instrumentos para medir la temperatura de la boca y otros para ser sostenidos en la mano. Su método de medida consistía en observar la distancia que recorría el líquido en

el termómetro durante diez golpes de un pulsilogium. Como esto depende no sólo de la temperatura del enfermo, sino también de la velocidad de su circulación periférica, que aumenta con la fiebre, la medida de Santorio de la rapidez de la elevación de la temperatura era probablemente una excelente indicación de la fiebre. En su *De Medicina Statica* (1614) describió un experimento que puso las bases del estudio moderno del metabolismo. Estuvo durante días sobre una enorme balanza, pesando los alimentos y los excrementos, y estimó que el cuerpo perdía peso a través de una «perspiradón invisible».

Es a Guillermo Harvey (1578-1657) a quien se debe principalmente la revolución en la Fisiología. Después de graduarse en Cambridge, Harvey estuvo cinco años en Padua, donde tuvo por maestro a Girolamo Fabrici d'Acuapendente (hacia 1533-1619), que era colega y médico personal de Galileo. En Padua, Harvey aprendió de tu venerado maestro a valorar el método comparativo (*vide infra*, pp. 248-249). La mayor parte de sus propias investigaciones sobre anatomía comparada se perdió durante la guerra civil inglesa, pero en los dos libros que contienen su estupenda contribución a la Ciencia acentúa la importancia de la anatomía comparada, tanto por ella misma como para elucidar la estructura y la fisiología del hombre. Examinó corazones de un gran número de vertebrados, incluyendo lagartos, ranas y peces, y de invertebrados, tales como caracoles, una pequeña quisquilla transparente e insectos. En los insectos observó el vaso dorsal pulsátil con una lente de aumento. Aunque su estancia en Padua coincidió con la enseñanza de Galileo,

no hay pruebas de que se encontraran alguna vez, ni Harvey menciona a Galileo en sus obras. Sin embargo, el método de Harvey de limitar la investigación en los procesos biológicos a problemas que podían ser resueltos por el experimento y la medida podría muy bien haber sido aprendido del gran mecanicista. En todo caso respiró la misma atmósfera, y aunque sus citas de la Lógica eran casi enteramente de Aristóteles, también se asemeja a Galileo en que su obra más importante era una exhibición práctica perfecta de los métodos de «resolución» y «composición».

La primera exposición que hizo Harvey de su teoría de la circulación general de la sangre aparece en sus notas de las conferencias dadas en el Real Colegio de Médicos en Londres de 1616 a 1618 (publicadas en 1886 como *Prelectiones Anatomiae Universalis*), aunque ésta parece haber sido un añadido posterior. Varios de los constituyentes de su teoría habían ya sido descubiertos por sus predecesores, pero nadie antes de él había visto que las dificultades suscitadas por la explicación de Galeno sobre el movimiento de la sangre eran de tal magnitud que exigían la revisión de toda la teoría. De hecho, la originalidad de Harvey, no menos que la de Galileo, surgió de su habilidad para mirar los viejos datos desde un punto de vista enteramente nuevo. La anatomía fundamental del sistema vascular era conocida desde la época de Galeno y familiar a los predecesores inmediatos de Harvey tanto como a él mismo. No fue sobre bases puramente anatómicas por lo que pudo rechazar la completa separación que Galeno establecía entre los sistemas venoso y arterial (cf. vol. I, pp. 151 y ss.). Realizó su reinterpretación

basándose en un cambio total de la teoría fisiológica; una vez que se aceptaba ésta, todas las estructuras anatómicas se colocaban en su lugar en el nuevo sistema.

Los principales puntos de la teoría de Galeno que aparecieron problemáticos a Harvey fueron sus afirmaciones, según las cuales:

- I. la sangre venosa se producía continuamente en el hígado a partir de los alimentos;
- II. salía del hígado y fluía por las venas a todas las partes del cuerpo;
- III. solamente una pequeña porción de ella entraba en el mismo corazón, y su ruta iba del ventrículo derecho al izquierdo para convertirse en sangre arterial (esto planteaba los problemas de la existencia de poros en el septo ventricular y en la circulación pulmonar);
- IV. la sangre arterial era expelida del corazón durante la diástole y su explicación del pulso arterial, y vi su exposición del movimiento en dos direcciones del aire y su consunción en la arteria venosa. El primer punto suscitaba el problema de la cantidad y velocidad de la sangre que circulaba por los vasos, y los otros los de la dirección del flujo y la acción del corazón. Ninguno de éstos fue considerado, sino aisladamente, por los predecesores de Harvey.

Leonardo da Vinci había defendido que el corazón era un músculo e hizo dibujos admirables de él que incluían el descubrimiento de la banda moderadora en la oveja. También había seguido el

movimiento del corazón en el cerdo por medio de agujas clavadas a través del pecho en el corazón y construido modelos para ilustrar el funcionamiento de las válvulas. Sus ideas sobre los movimientos de la sangre eran, sin embargo, casi enteramente galénicas y, además, no se sabe si sus manuscritos anatómicos tuvieron una influencia similar a los que trataban de Mecánica. El médico francés Jean Femel parece haber sido el primero en observar, en 1542, que, contrariamente a las enseñanzas corrientes, cuando se contraían los ventrículos (sístole) las arterias *aumentaban* de tamaño, y en afirmar que esto sucedía a causa de la sangre (y espíritus comprimidos) que entraba en ellas. Pero, en general, Femel expresó ideas aceptadas antes de Harvey, al relacionar el movimiento del corazón primordialmente con la función supuestamente refrigeradora de la respiración y argumentar en favor de Galeno contra Aristóteles a propósito de la causa de su acción y del pulso. En 1543 Vesalio publicó sus observaciones, que muestran que no fue capaz de descubrir poros en el septo ventricular; había explorado las cavidades del septo y vio que «ninguna de estas cavidades penetra (al menos en lo perceptible por los sentidos) del ventrículo derecho al izquierdo» (cf. lámina 3). En la segunda edición (1555) de su *De Fabrica (vide infra, pp. 243-244)* era todavía más terminante acerca de la ausencia de cavidades, señalando: «Tengo serias dudas sobre el funcionamiento del corazón a este respecto»⁴². Una duda semejante, junto con la opinión de que el corazón era un músculo y tenía dos y no tres ventrículos, había ya sido afirmada por el médico egipcio (o sirio) del siglo XIII Ibn al-Nafis al-Qurashi.

Ibn al-Nafis había defendido, tanto contra Avicena como contra Galeno, que, puesto que no había ningún peso en el septo, la sangre venosa debía pasar del ventrículo derecho al ventrículo izquierdo, vía vena arterial (arteria pulmonar), a través de los pulmones, donde se esparcía por su sustancia y se mezclaba allí con el aire que contenían, y luego volvía a la parte izquierda del corazón por la arteria venosa (vena pulmonar). Esta obra parece que fue desconocida en Occidente⁴³; el primer autor occidental que publicó la teoría de la circulación pulmonar (1553) fue el sabio catalán Miguel Servet (1511-1553), quien mencionó en el curso de una discusión teológica que parte de sangre pasaba del ventrículo derecho al izquierdo por los pulmones, donde cambiaba de color. Suponía también que parte pasaba a través del septo interventricular. Las preocupaciones de Servet eran primordialmente teológicas y es probable que derivó estas ideas de alguna otra fuente, aunque de hecho había estudiado Anatomía, siendo discípulo de Johannes Günther de Andernach en París en la misma época que el propio Vesalio. En la actualidad no hay pruebas de que él o el anatomista de Padua Realdo Colombo (hacia 1516-1559) conocieron a Ibn al-Nafis, y algunos investigadores han sugerido que fue Servet quien inspiró a Colombo sus ideas sobre la circulación menor. En vista del curioso contexto en el que Servet anunció el descubrimiento, otros han sugerido que era más probable que la influencia se hubiera realizado en la otra dirección; es incluso posible que Colombo dedujera la idea de la circulación menor del mismo Vesalio, del que había sido discípulo en Padua. El

propio Colombo, en su *De Re Anatómica* (1559), no sólo propuso la idea de la circulación pulmonar, sino que también la apoyó con experimentos. Observó, como había hecho Femel, que la sístole cardíaca (contracción) coincidía con la *expansión* arterial, y la diástole cardíaca (expansión), con la contracción arterial; y mostró, además, que el cierre completo de la válvula mitral impedía la pulsación de la vena pulmonar. Cuando abrió esta vena no encontró humos, como habrían esperado los galenistas, sino sangre, y concluyó que la sangre pasaba del pulmón (en donde se observaba un cambio de color) por la vena pulmonar de vuelta al lado izquierdo del corazón. Como Servet, creía que parte de la sangre pasaba también a través del septo interventricular. Ambos autores defendieron también la opinión galénica de que la sangre se hacía en el hígado. Así, pues, ninguno de ellos tenía idea de la verdadera naturaleza de la sangre, y aunque Colombo había observado que el pulso del cerebro era sincrónico con el de las arterias, no llegó a la idea de la circulación general o sistemática. Lo mismo puede decirse del discípulo catalán de Colombo, Juan Valverde, que hizo una exposición de la circulación menor en 1554. Parece que Valverde no pretendió haber sido original, y algunos investigadores han argumentado —sobre la base de que, como Servet, afirmó que la vena pulmonar contenía a la vez sangre y aire— que fue Servet quien le influenció. Otros, contra esta opinión, han argumentado que fue a partir de las enseñanzas de Colombo de donde aprendió Valverde la idea de la circulación menor; el tratado de Colombo, publicado póstumamente en 1559, pudo muy bien haber sido

escrito antes que el de Valverde. Es cierto que el propio Colombo pretendió que la nueva idea era suya y, hasta entonces, desconocida.

El anatomista holandés Volcher Coiter (1534-hacia 1576) también realizó algunos experimentos sobre el corazón. Realizó un estudio comparado de corazones vivos de gatos, pollos, víboras, lagartos, ranas y anguilas, y observó que en el órgano estirpado las aurículas se contraían antes que los ventrículos y que el corazón se alargaba en la sístole y se acortaba en la diástole. También mostró que un pequeño trozo de músculo separado del corazón podía seguir latiendo.

El fisiólogo y botánico italiano Andrea Cesalpino (1519-1603) realizó asimismo algunas observaciones sobre el movimiento de la sangre. Decía, en sus *Questionum Peripateticarum* (1571), que cuando el corazón se contraía, impulsaba a la sangre hacia la aorta, y cuando se dilataba, recibía sangre de la *vena cava*. En sus *Quaestionum Medicarum* (1593), libro 2, cuestión 17, decía:

Los pasajes del corazón están dispuestos de tal manera por la naturaleza que de la vena cava pasa un flujo al ventrículo derecho, de donde se abre la vía al pulmón. Del pulmón, además, parte otra entrada hacia el ventrículo izquierdo del corazón, desde el que hay abierta una vía a la arteria aorta, y hay unas membranas en la boca de los vasos colocadas de tal forma que impiden el retorno. Así, hay una especie de movimiento perpetuo desde la vena cava por el corazón y los pulmones hasta la arteria aorta, como he explicado en mis

Cuestiones peripatéticas. Si tomamos en cuenta que en el estado de vigilia hay un movimiento de calor natural hacia el exterior, es decir, hacia los órganos de los sentidos, mientras que en el estado de sueño hay, al contrario, un movimiento hacia el interior, esto es, hacia el corazón, debemos pensar que en el estado de vigilia gran parte de los espíritus y de la sangre se introducen en las arterias, puesto que es por ellas por donde se tiene acceso a los nervios, mientras que, por otra parte, durante el sueño el calor animal vuelve por las venas al corazón, pero no por las arterias, ya que el acceso suministrado por la naturaleza al corazón es a través de la vena cava, y no a través de la aorta... Porque en el sueño el calor innato pasa de las arterias a las venas por el proceso de comunicación llamado anastomosis, y de allí al corazón.

Utilizaba esta exposición para explicar las observaciones de que cuando una vena era ligada se hincha por la parte alejada del corazón. Pero sus ideas sobre el tema carecían de claridad y decisión, y en su última obra en 1602-1603 afirmó formalmente que la sangre *salta* del corazón tanto por las venas como por las arterias. Aunque utilizó el término *circulatio* lo entendía en el sentido de un movimiento de ida y vuelta como en la subida y bajada de un líquido, evaporación seguida de condensación, en la destilación química. Así, pues, no entendió la circulación general mejor que Colombo, Servet y Valverde, o que Cario Ruini —que en 1598 publicó también una descripción de la circulación pulmonar o

menor en su tratado de anatomía del caballo— o Fabrici, que en 1603 presentó los primeros dibujos claros y adecuados de las válvulas de las venas, pero que creía que su función consistía en contrarrestar el efecto de la gravedad e impedir que la sangre se acumulara en las manos y en los pies. (Estas válvulas habían sido descritas por Charles Estienne en 1545 [*vide infra*, p. 241] y después fueron estudiadas por varios anatomistas, ninguno de los cuales comprendió su función.)

La teoría de la circulación general de la sangre fue, de hecho, presentada por primera vez por Guillermo Harvey y publicada en 1628 en su *Exercitatio Anatómica De Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus*. Según su propia afirmación, y la evidencia de las *Prelectiones*, sus dudas sobre el sistema galénico y su convicción de que la sangre circulaba se desarrolló por etapas durante los nueve años precedentes.

Existe una conversación recogida por Robert Boyle en 1688, pero que se remonta a treinta años antes, aunque casi veinte años después de la publicación del *De Motu Cordis*, en la que Harvey mismo parece conectar esta teoría con los resultados de la gran tradición italiana de estudios anatómicos. «Recuerdo —escribía Boyle—

que cuando pregunté al famoso Harvey, en la única conversación que sostuve con él (que fue un poco antes de su muerte), cuáles fueron las cosas que le indujeron a pensar en la circulación de la sangre, él me respondió que cuando tuvo noticia de que las válvulas de las venas de tantas partes del

cuerpo estaban colocadas de forma que daban paso libre a la sangre hacia el corazón, pero que se oponían al paso de la sangre venosa en dirección contraria, fue alentado a imaginar que una causa tan providente como la naturaleza no[^] había colocado tantas válvulas sin ningún propósito; y ningún propósito parecía más probable, puesto que la sangre, a causa de las válvulas interpuestas, no podía ser bien enviada por las venas a los miembros, debía serlo por las arterias, y volver por las venas, cuyas válvulas no se oponían a su curso en esa dirección.» (Boyle, Obras, 1772, vol. V, p. 427.)

Más recientemente se ha sugerido que la teoría de Harvey de la circulación general fue una continuación natural de la obra de sus predecesores sobre la circulación pulmonar. Ninguna de estas sugerencias recibe apoyo de sus propias obras, pero a otro nivel, el del método, es clara la tradición italiana. El propio Harvey nos muestra que su gran intuición le vino del empleo del método comparativo; su habilidad para seguir sus consecuencias hasta el fin le vino de su clara comprensión del uso del experimento y la medida. Todo esto era la enseñanza de Padua, pero fue el empleo que hizo de estos métodos lo que le elevó a un nivel mucho más alto de originalidad.

Ello es evidente por el contraste entre él y los anatomistas que habían estudiado la circulación pulmonar. Estos no habían cuestionado nunca la hipótesis básica galénica de que las venas y el lado derecho del corazón formaban un sistema, centrado en el

higado, que era completamente distinto por su función y su estructura del sistema formado por las arterias y el lado izquierdo del corazón. Entre los dos se encontraban los pulmones, que recibían alimento de la sangre venosa enviada por el ventrículo derecho, que suministraban a partir del aire el principio de su conversión en sangre arterial en el ventrículo izquierdo, enfriando y limpiando el mismo corazón. Se habían limitado a investigar la solución de un problema particular: cómo la sangre pasaba del lado derecho al izquierdo del corazón en el hombre, un problema que se suscitaba y era resuelto dentro del mismo sistema de Galeno. Mirando más allá del hombre a toda una gama de animales de sangre roja, incluso a animales como la quisquilla, insectos y caracoles, Harvey vio que éste era solamente una parte del problema más general del movimiento de la sangre en el cuerpo considerado como un todo. En los peces, que no tenían pulmones, en las ranas, renacuajos, culebras y lagartos —que se parecían a los peces por tener un solo ventrículo— y también en los embriones de animales pulmonados, no se planteaba de ninguna forma el primer problema. «La práctica común de los anatomistas —escribía en el capítulo 6 del *De Motu Cordis*— al dogmatizar sobre la estructura general del cuerpo a partir de la disección de únicamente cadáveres humanos, es objetable. Es como diseñar un sistema general de política a partir del estudio de un único estado, o pretender conocer toda la agricultura a partir del examen de un solo campo.» Es una falacia intentar sacar conclusiones de una proposición particular. «Si los anatomistas hubieran estado tan familiarizados con la disección de

animales inferiores como lo están con la del cuerpo humano, las cosas que los han mantenido hasta ahora en la perplejidad de las dudas se habrían visto, en mi opinión, liberadas de todo tipo de dificultad.»

Lejos de ser una mera continuación de la obra de sus predecesores, el principal objetivo del argumento de Harvey consistía en proponer, y demostrar por el experimento y la evidencia accesoria, una conclusión diametralmente opuesta a sus hipótesis básicas galénicas sobre el curso de la sangre y la acción del corazón. La cuestión de la circulación pulmonar juega un papel muy secundario en toda esta argumentación; de hecho, él lo estudió ampliamente sólo en una carta, escrita en 1651, a Paul Marquard Slegei de Hamburgo. La originalidad de Harvey fue en todo caso mayor que la suma de contribuciones de sus predecesores. Lo que él hizo fue el primer intento desde Galeno de «un sistema general de política» en cuestiones de anatomía y fisiología. Fue el primero en elaborar una teoría que, como insistía en el *De Motu Cordis* y en las controversias a las que dio lugar, comprendía en un sistema general a todos los sistemas circulatorios particulares de los distintos animales y embriones. Demostrando una alternativa de la doctrina central del sistema de Galeno, suscitó todo un nuevo conjunto de problemas sobre la fisiología en general.

El estudio de Harvey, tanto en las *Prelectiones* como en el *De Motu Cordis*, indica que lo que le condujo a sus primeras dudas fue la afirmación de Galeno de que la sangre dejaba el corazón durante la diástole y su exposición del pulso arterial. El argumento en las

Prelectiones sigue de cerca al de los ocho primeros capítulos del *De Motu Cordis*. Ambos comienzan con una «resolución» del problema en sus partes, de manera que la causa pudiera ser descubierta a partir de sus efectos. Después de analizar las dificultades de la teoría de Galeno, citando muchas observaciones realizadas por otros, se concentró en demostrar que la acción del corazón, durante la sístole, la naturaleza del pulso y el subsiguiente flujo continuo de la sangre por el corazón, en varios animales y fetos, era resultado de su latido continuado. Las *Prelectiones* concluían con un establecimiento de la hipótesis de la circulación general semejante al de los ocho primeros capítulos del *De Motu Cordis*. Probablemente la discusión en sus conferencias se detenía ahí, porque estaba haciendo demostraciones de la anatomía del tórax en su conjunto y debían ser acabadas en un día, pues no había productos de conservación. Los capítulos restantes del *De Motu Cordis* forman claramente una segunda sección que corresponde a la parte «compositiva» del argumento. Describía la comprobación de su hipótesis por tres consecuencias que se seguían de ella; la enunciaba definitivamente en el capítulo 14, y añadía otras pruebas.

Comenzó su demostración señalando que la contracción del corazón era una contracción muscular que se iniciaba en las aurículas y que pasaba a los ventrículos, cuya contracción provocaba entonces la expansión de las arterias. Contra las teorías tanto de Aristóteles como de Galeno (*vide* vol. I, p. 152) iba a concluir que el corazón actuaba como una especie de bomba energética, pero esto vino

después. La secuencia de las contracciones sugería que se producía un flujo de sangre desde las venas pasando por el corazón a las arterias, y que la disposición de las válvulas venosas impedirían su retorno. Mostró entonces que si se perforaba la arteria pulmonar o la aorta solamente, la contracción del ventrículo derecho iba seguida por un chorro de sangre por la arteria pulmonar, y que la contracción del ventrículo izquierdo por un chorro de sangre por la aorta; los dos ventrículos se contraían y dilataban al unísono. Señaló que en el feto la estructura del corazón y de los vasos estaba dispuesta para no pasar por los pulmones, que todavía no funcionaban. Decía que la sangre de la *vena cava* pasaba por una abertura, el *foramen ovale*, a la vena pulmonar, y así por el camino del ventrículo izquierdo pasaba a la aorta. (En realidad, el *foramen ovale* se abre directamente hacia el ventrículo izquierdo.) La sangre que entraba en la arteria pulmonar era llevada a la aorta por el *ductus arteriosus* fetal. Los dos ventrículos operaban, pues, como uno, y el estado embrionario de animales con pulmones correspondía al de animales adultos, como el pez, que no tenía pulmones. En los animales adultos con pulmones la sangre no podía pasar a través de los dos pasos fetales, que estaban cerrados, sino que tenía que ir del lado derecho del corazón al izquierdo a través de los tejidos de los propios pulmones.

De la estructura y continuo latir del corazón, Harvey concluyó que el flujo de la sangre por él no era en una sola dirección, sino que también era continuo. De esto se seguiría que, a menos que hubiera algún paso de vuelta desde las arterias a las venas en todo el

cuerpo, tanto como en los pulmones, las venas se vaciarían en seguida y las arterias se romperían por la cantidad de sangre que entraría en ellas. No había, pues, forma de evitar la hipótesis que enunció en el capítulo 8 de *De Motu Cordis*:

Empecé a pensar si no habría un movimiento como si fuera én círculo. Ahora bien, eso es lo que encontré luego ser cierto; y finalmente vi que la sangre era expulsada del corazón y conducida, por el latir del ventrículo izquierdo, por las arterias a todo el cuerpo y a sus diferentes partes, de la misma forma que es enviada, por el latir del ventrículo derecho, por la vena arterial [arteria pulmonar] a los pulmones, y que retoma por las venas a la vena cava, y de esa forma al ventrículo derecho, de la misma manera que retorna de los pulmones por la arteria venosa [vena pulmonar] al ventrículo izquierdo.

Harvey, para proceder a comprobar esta hipótesis, hizo a continuación una serie de deducciones que, si se verificaban experimentalmente, la confirmarían y eliminarían a la vez las hipótesis rivales de Galeno de que la sangre era producida ininterrumpidamente por el hígado a partir del alimento ingerido. Primero demostró que, pasando la sangre por el corazón solamente en una dirección, se podía calcular —a partir de la capacidad del corazón y la rapidez de sus latidos— que bombeaba en una hora, de las venas a las arterias, pasando por él mismo, una cantidad mayor que todo el peso del cuerpo. Confirmó mediante experimentos ulteriores que la sangre pasaba continuamente por el corazón sólo

en una dirección desde las venas a las arterias. En una serpiente, cuyos vasos estaban dispuestos convenientemente para la investigación experimental, al pintar la *vena cava* el corazón se vaciaba y se volvía pálido, mientras que cuando la aorta se cerraba por el mismo procedimiento el corazón se dilataba y se ponía violáceo. Esto concordaba con la disposición de las válvulas. En segundo lugar mostró, mediante experimentos con ligaduras, que la misma cantidad de sangre que pasaba por el corazón era impulsada a través de las arterias hacia la periferia del cuerpo, y que allí la sangre circulaba con el mismo flujo continuo en una dirección solamente, pero, en esas partes, iba de las arterias a las venas. En los miembros las arterias están situadas profundamente, mientras que las venas están próximas a la superficie. Una ligadura moderadamente apretada alrededor del brazo comprimiría las venas, pero no las arterias, y constató que esto producía una distensión de la mano por la sangre acumulada. Una ligadura muy apretada detenía completamente el pulso y el flujo de sangre en la mano y no se observaba ninguna distensión. Finalmente mostró que la sangre retornaba al corazón por las venas. Las investigaciones anatómicas mostraron que las válvulas estaban dispuestas en las venas de modo que la sangre podía fluir solamente hacia el corazón, un hecho en el que Fabrizi no había caído en la cuenta. Harvey demostró que cuando el brazo estaba ligado moderadamente de manera que las venas se vaciaban, se formaban «nodos» en la posición de las válvulas. Si la sangre se impulsa en la vena, por la parte inferior de la válvula, apretando con el dedo en la dirección

periférica, la sección vacía permanecía achatada; concluyó que esto se debía a que la válvula impedía a la sangre volver. Confirmó esta explicación con experimentos ulteriores del mismo tipo. Llegó, por tanto, a la conclusión definitiva en el capítulo 14 de *De Motu Cordis*.

Puesto que todas las cosas, tanto el argumento como la demostración ocular, muestran que la sangre pasa por los pulmones y el corazón gracias a la acción de los ventrículos y es enviada para ser distribuida por todas las partes del cuerpo, donde sigue su camino, a través de los poros de la carne, hacia las venas; y entonces fluye por las venas de la circunferencia por todos lados al centro, desde las venas menores a las mayores, y es, finalmente, descargada por ellas en la vena cava y en la aurícula derecha del corazón; y esto en tal cantidad, con tal flujo por las arterias y tal reflujó por las venas, que posiblemente no puede ser suministrado por los alimentos ingeridos y que es mucho mayor que lo necesario para el mero fin de la nutrición; por tanto, es necesario concluir que la sangre en el cuerpo animal es impelida en círculo y es un estado de movimiento incesante; que esto es la acción o función que realiza el corazón por medio de su pulso; y que éste es el único solo fin del movimiento y contracción del corazón.

El tratado de Harvey, publicado en Frankfurt en el escenario de una feria anual del libro, fue ampliamente distribuido. A pesar de las críticas de algunos profesores consagrados, como Jean Riolan de París, su teoría fue adoptada con bastante rapidez, en particular por

los jóvenes anatomistas —un ejemplo del hecho de que a menudo una sola generación puede apreciar una revolución fundamental, en parte debido a que para ella la teoría ha dejado de ser revolucionaria. John Aubrey escribió en su retrato de Harvey:

Le he oído decir que, después de que su libro sobre la circulación de la sangre se publicara, bajó mucho su clientela, que la gente vulgar creía que estaba loco; y todos los médicos estaban en contra de su opinión y le tenían envidia; muchos escribieron contra él, como el doctor Primige, Paracisanus, etc. Con mucho esfuerzo, por fin, después de alrededor de veinte o treinta años, fue aceptado en todas las universidades del mundo; y, como el señor Hobbes dice en su libro De Corpore, es quizá el único hombre que vivió para ver su propia doctrina aceptada durante su vida.

La teoría de Harvey fue una iluminación inmensa para la Fisiología, hacia la que dirigió la atención de todos los biólogos. Su tratado proporcionó un modelo de método. Después de él el estudio abstracto de cuestiones como la naturaleza de la vida o del «calor innato» dejó paso a la investigación empírica de cómo funcionaba el cuerpo. El mismo había dejado algo vago el paso de la sangre de las arterias a las venas, y la demostración de esta teoría fue completada, finalmente, cuando, en 1661, Malpighi observó con el microscopio el paso de la sangre por los capilares de los pulmones de la rana. Alrededor de la misma época Jean Pecquet y Thomas Bartholin descubrieron el sistema linfático; se comenzó con las

observaciones de Pecquet, al final de la vida de Harvey, de los vasos lechosos, que llevan el quilo (grasa emulsionada) del intestino delgado a las venas por la vía del ducto torácico —un importante complemento de la teoría de Harvey que el anciano fisiólogo rechazó basándose en la anatomía comparada que había guiado su propia obra. No pudo encontrar trazas de dichos vasos ni en las aves ni en los peces. «Ni —escribía al doctor R. Morrison— veo ninguna razón de que la ruta por la que el quilo es llevado en un animal no deba ser la que lo lleva en todos los demás animales; ni en verdad, si es necesaria una circulación de la sangre en este asunto, como realmente lo es, que haya ninguna necesidad de inventar otro modo.» Esas grandes aptitudes para la generalización teórica a las que debía su mayor descubrimiento le iban a cegar respecto a la aparente inconsecuencia de los hechos.

El estudio de la sangre, portadora del alimento y del oxígeno, estaba de hecho bien situado para constituir los fundamentos de la Fisiología, y la elucidación por parte de Harvey de su mecánica fue seguida más tarde, en el siglo XVII, por las investigaciones, especialmente de Boyle, Hooke, Lower y Mayow, sobre el problema químico de la respiración, que relacionaron por primera vez con el problema general de la combustión.

Sin embargo, el propio Harvey nunca entendió la función de la respiración, y cuando vayamos a estudiar sus opiniones sobre el fin de la circulación en general, debemos situarnos en el contexto de una filosofía de la naturaleza muy diferente de la de la moderna fisiología, un conjunto de cuestiones que se extiende más allá del

ámbito de aquellas a las que la aclaración de la mecánica de la circulación dada por Harvey fue la respuesta positiva incorporada en la ciencia moderna.

La filosofía de la naturaleza de un período diferente al nuestro, todo el complejo de suposiciones y concepciones que una explicación particular satisface en un momento determinado, viene expresada más claramente a veces por autores secundarios que por los grandes innovadores cuya originalidad transforma inevitablemente el contexto de ideas en el que nacieron. Uno de los primeros contemporáneos en aceptar la teoría de Harvey fue el médico londinense, alquimista y rosacruciano, Robert Fludd, muchas de cuyas propias obras habían sido publicadas por el mismo editor de Frankfurt. Pero Fludd vio en el gran descubrimiento de «su amigo, colega y compatriota, muy versado no sólo en la anatomía, sino también en los más profundos misterios de la Filosofía», como llamaba a Harvey en su *Integrum Morborutn Mysterium*, en 1631, no el comienzo de una nueva Fisiología, sino una demostración de algo completamente diferente: de la correspondencia del microcosmos del cuerpo y el macrocosmos de las esferas celestes; una demostración de que el espíritu de la vida retenía una impresión del sistema planetario y del zodiaco, una impresión del movimiento circular de los cuerpos celestes que gobernaba el mundo inferior.

Es evidente que Harvey mismo, frío, claro y racional como era, un científico empírico hasta la medula de su mente, no habría rechazado la alabanza. Al final del pasaje ya citado del capítulo 8 de *De Motu Cordis*, en el que describía cómo le vino a la mente la idea

de la circulación, Harvey relacionaba el movimiento de la sangre a una visión general del mundo. Su visión, como buen discípulo de Padua, es básicamente aristotélica: «La autoridad de Aristóteles tiene siempre tal peso para mí que nunca pienso apartarme de él inconsideradamente», como decía más tarde en el *De Generatione Animalium* (exercitatio II). Era fundamental para la filosofía de la naturaleza de Aristóteles que el movimiento circular fuera la forma más noble de movimiento y que el movimiento circular de los cuerpos celestes fuera el patrón al que aspiraban los movimientos de los cuerpos sublunares y en particular de los microcosmos de los cuerpos vivientes. Aristóteles había hecho del corazón el órgano principal del cuerpo y el origen de la sangre y los vasos. Harvey, después de su exposición del bombeo mecánico de la sangre por el cuerpo gracias a la acción del corazón, compara su movimiento circular al ciclo del agua que se evapora por el calor del Sol de la tierra húmeda y que retorna de nuevo en forma de lluvia, produciendo así la generación de los seres vivos, y al ciclo anual del clima con la aproximación y alejamiento del Sol; ambos, «como dice Aristóteles..., emulan el movimiento circular de los cuerpos superiores».

Y así, con toda probabilidad viene a pasar en el cuerpo, por medio del movimiento de la sangre. Todas las partes pueden ser alimentadas, calentadas y avivadas por la más cálida y más perfecta, vaporosa, espirituosa y, por decirlo así, nutritiva sangre; y ésta, al contrario, puede hacerse, en contacto con las partes, fría, espesa y, por decirlo así, estéril, de manera que

retorna a su origen, el corazón, como a su fuente, el templo más interno del cuerpo, para recobrar su perfección y virtud. Aquí es licuada de nuevo por el calor natural —potente, ardiente, una especie de tesoro de la vida—, y es impregnada con espíritus y, como se podría decir, con bálsamo; y desde allí es dispersada de nuevo; y todo esto depende del movimiento y latir del corazón. Por consiguiente, el corazón es el principio de la vida, el sol del microcosmos; igual como el Sol en su giro, podría bien ser llamado el corazón del universo; porque es por la potencia (virtus) y latir del corazón por lo que se mueve la sangre, perfeccionada y animada (vegetatur)... porque el corazón es, en verdad, la perfección de la vida, la fuente de toda acción.

Harvey compartía esta visión del modelo cosmológico en el que la circulación de la sangre tenía su lugar con otro aristotélico, Cesalpino. Como Harvey, Cesalpino había considerado la renovada «perfección» de la sangre como el fin inmediato de su paso por el corazón; y como Harvey, describió un proceso cíclico de calentamiento y evaporación en el corazón, seguido con enfriamiento y condensación en las partes del cuerpo, comparable al ciclo químico de la *distillatio*. Estas ideas, la analogía del microcosmos y el macrocosmos, el predominio de los ciclos en la naturaleza, la excelencia del círculo, eran de hecho tópicos y estaban presentes bajo diferentes formas en todas las obras aristotélicas, alquímicas, paracelsianas y neoplatónicas de la época. Aparecen, por ejemplo, en la embriología simbólica de Peter

Severinus (1571) y de Johann Marcus Marci de Kronland (1635). El mismo Harvey retornó a ellas en su *De Generatione Animalium* (1651) como la analogía del venir e ir de nuevas generaciones, en particular en el ciclo del cambio, descrito en su teoría de la «epigénesis», de la semilla indiferenciada a la primera materia diferenciada, la sangre, de allí al adulto completamente diferenciado, y de nuevo a la semilla que forma la nueva generación. Es esta concepción filosófica de los ciclos la que une los dos grandes campos de la obra de Harvey (*vide infra*, pp. 250-251), y es un buen ejemplo del hecho de que si queremos comprender la aparición de un descubrimiento o una nueva explicación, y la forma concreta que adopta, debemos mirar más allá de las bases puramente empíricas sobre las que descansa. Estas últimas nunca son realmente las únicas que determinan las expectativas del científico y la dirección de su atención y su visión; son inevitablemente, hasta cierto punto, los productos de una teoría, y ciertamente en el caso de Harvey producto de hipótesis ontológicas no verificadas sobre el mundo, que formaban su filosofía de la naturaleza. Pero la diferencia entre un científico como Harvey y los meros especuladores como Fludd, con quien podía haber compartido tantas suposiciones de ese tipo, residía en que sometía sus teorías a comprobaciones empíricas efectivas. En este aspecto estuvo con Fludd en la misma relación que tuvo Kepler. Hasta el fin de su vida Harvey negó que la sangre sufriera ningún cambio esencial en los pulmones; sostuvo que la sangre era enfriada en el cuerpo en general y creyó que la idea tradicional, de que la respiración la enfriaba de manera especial,

podría ser correcta. Pero distinguió este problema del *hecho* de la circulación: «Soy de la opinión —escribía en la *Second Disquisition to Jean Riolan* (1649)— de que nuestro primer deber es investigar si la cosa es o no es, antes de preguntar por qué es.» La gran fuerza de Harvey como maestro del método experimental y su superioridad sobre todos los otros biólogos de su tiempo residía en que poseía las dotes de imaginación que le hicieron un gran descubridor y un gran teórico, y los dones de la razón que le enseñaron cómo comprobar sus teorías por medio de experimentos cuantitativos y exactos.

Las cualidades teóricas estaban presentes en grado superlativo en la inteligencia del cofundador, con Harvey, de la fisiología moderna, Descartes. En su *Discours de la méthode* (1637), Descartes había expresado la esperanza de conseguir reglas que podrían revolucionar la medicina de la misma forma que había intentado reformar las otras ciencias. Fue uno de los primeros en aceptar el descubrimiento de Harvey de la circulación de la sangre, aunque no entendió la función de bombeo del corazón, que él todavía creía que producía su obra por medio del calor vital. Aunque atribuía el mérito del descubrimiento de la circulación de la sangre a *un médecin d'Angleterre* (*Discours*, parte 5), Descartes pretendía para sí mismo el mérito de la elucidación del mecanismo del corazón. Creyó que era el calor vital del corazón lo que hacía que se expandiera al vaporizar la sangre que había arrastrado a su interior durante la contracción, y que era esta expansión en la diástole la que enviaba la sangre por la arteria al cuerpo y los pulmones, donde se enfriaba y licuaba para volver al corazón, donde el ciclo comenzaba de nuevo.

Descartes estaba de hecho reviviendo la explicación de Aristóteles, en oposición a Galeno y a Harvey (cf. vol. I, p. 153; *infra*, pp. 270 y ss.). Es realmente curioso que un hombre que pretendía haberse desprendido de todos los prejuicios anteriores repitiera el antiguo error, ya detectado un siglo antes, de que la sangre saliera del corazón durante la diástole, y que su sistema fisiológico en conjunto se pareciera tanto al de Galeno y Aristóteles. Pero no es por esos detalles por lo que se tiene que juzgar los logros de Descartes; ciertamente, si le hubieran producido alguna duda quizá nunca los hubiera realizado. Su contribución consistió en captar y afirmar una gran idea teórica: que el cuerpo es una máquina y que todas sus operaciones deben ser explicadas por los mismos principios y leyes físicos que se aplican al mundo inanimado. Aunque todavía utilizaba términos como «espíritus», éstos eran meramente materiales y obedecían a las leyes mecánicas; los espíritus y principios específicos encargados en la antigua fisiología de cada función concreta habían sido eliminados. Mientras que la filosofía de la naturaleza, el sistema de analogías con ciclos de la naturaleza y con el Sol, dentro del que Harvey elaboró su teoría del movimiento del corazón fue de poca utilidad para sugerir investigaciones ulteriores, el mecanicismo de Descartes iba a ser fructífero inmediatamente. A pesar de su error se había apuntado un tanto contra Harvey al urgir la cuestión de la *causa* del latir del corazón. Quería mostrar que éste podía seguirse de leyes mecánicas conocidas y aparecer así como un fenómeno esperado dentro del sistema general de la Mecánica.

«Pero a fin de que quienes ignoran la fuerza de las demostraciones matemáticas —escribía en la parte 5 del *Discours*— y que no están acostumbrados a distinguir las verdaderas razones de las meras verosimilitudes se aventuren, sin examen, a negar lo que se ha dicho, deseo que se considere que el movimiento que acabo de explicar se sigue tan necesariamente de la sola disposición de las partes, y del calor que puede ser sentido por los dedos, y de la naturaleza de la sangre que es conocida por la experiencia, como hace el movimiento de un reloj por la potencia, la posición y la forma de sus contrapesos y ruedas.»

Descartes, al presentar su teoría mecanicista, hizo, explícitamente, una contribución aún mayor a la Fisiología, porque lo hizo en términos de uno de los *métodos* más fecundos conocidos en la Ciencia: el método del modelo teórico. Descartes, un teórico del método científico y un buen físico y fisiólogo, era completamente consciente de lo que estaba haciendo; fue él quien hizo del método del modelo físico y químico el instrumento poderoso de análisis que desde entonces no ha dejado de serlo en la investigación fisiológica. Su *homme machine* era un cuerpo teórico, que intentó construir a partir de los principios conocidos de la Física de tal manera que pudiera deducir de él los fenómenos fisiológicos observados en los cuerpos vivos reales. En sus *Primae Cogitationes área Generationem Animalium* incluso abordó la cuestión fundamental de las máquinas que engendran máquinas. Su fisiología era galénica y aristotélica, pero eran Galeno y Aristóteles *more geométrica demónstrala*.

Además, Descartes tenía un conocimiento del tema de primera

mano; pasó varios años estudiando anatomía, y en *La Dioptrique*, publicada junto con el *Discours* como una parte de su ilustración del método, hizo contribuciones fundamentales a la fisiología de la visión.

He decidido abandonar a toda la gente en sus discusiones — escribía en la parte 5 del Discours— y hablar solamente de lo que sucedería en un mundo nuevo, si Dios fuera a crear ahora, en alguna parte, en los espacios imaginarios, materia suficiente para componer uno, y fuera a agitar varia y confusamente las diferentes partes de esta materia, de tal manera que resultara un caos tan desordenado como los poetas nunca han imaginado, y después de esto no hiciera nada más que prestar su concurso ordinario a la naturaleza, y permitirle actuar de acuerdo con las leyes que El hubiera establecido.

De la teoría mecanicista del cuerpo vivo, que pretendía poder derivar de estas leyes, decía:

Ni parecerá extraño en absoluto esto a quienes están familiarizados con la variedad de movimientos realizados por distintos autómatas, o máquinas que se mueven, fabricados por la industria humana, y con la ayuda de pocas piezas comparada con la gran multitud de huesos, músculos, nervios, arterias, venas y otras partes que se encuentran en el cuerpo de todo animal. Esas personas mirarán a este cuerpo como una máquina fabricada por las manos de Dios, que está incomparablemente mejor dispuesta y adecuada para

movimientos más admirables, que en cualquier máquina de invención humana.

Hizo una exposición detallada de este cuerpo teórico en su tratado *L'Homme*, que formaba parte del *Le Monde ou Traité de la lamiere* (acabado en 1633, pero publicado póstumamente en 1664).

Supongo que el cuerpo no es nada más que una estatua o máquina de arcilla —escribía—; vemos relojes, fuentes artificiales, molinos y otras máquinas semejantes que, aunque fabricadas por el hombre, tienen, sin embargo, el poder de moverse a sí mismas de diferentes modos; y me parece que no podría imaginar tantas clases de movimiento en él, que supongo hecho por la mano de Dios, ni atribuirle tanto artificio que no tuvierais motivos para pensar que todavía puede tener más...

Deseo que consideréis, después de esto, que todas las funciones que he atribuido a esta máquina, como la digestión de los alimentos, el latir del corazón y de las arterias, la alimentación y el crecimiento de los miembros, la respiración, la vigilia, el sueño, la recepción de la luz, de los sonidos, de los olores, de los gustos, del calor y de otras cualidades parecidas en los órganos de los sentidos externos; la impresión de sus ideas en el órgano del sentido común y de la imaginación; la retención o la impresión de esas ideas en la memoria; los movimientos interiores de los apetitos y de las pasiones; y, en fin, los movimientos exteriores de todos los miembros, que siguen tan adecuadamente tanto a las acciones de los objetos que se

presentan a los sentidos como a las pasiones e impresiones que están en la memoria, que imitan tan perfectamente como es posible los de un hombre verdadero; deseo, digo, que consideréis que estas funciones se siguen todas naturalmente, en esta máquina, de la sola disposición de sus órganos, ni más ni menos como se siguen los movimientos de un reloj, u otro autómeta, de la de sus contrapesos y sus ruedas; de forma que no es necesario en su caso concebir en ella ninguna otra alma vegetativa ni sensitiva, ni ningún otro principio del movimiento y de la vida, más que su sangre y sus espíritus agitados por el calor del fuego que arde continuamente en su corazón y que no tiene una naturaleza distinta de todos los fuegos que existen en los cuerpos inanimados.

En la teoría de Descartes el cuerpo de un ser humano estaba habitado por un alma racional. Puesto que el pensamiento era una sustancia pensante inextensa, mientras que el cuerpo era una sustancia extensa no pensante, algunos de sus críticos y seguidores, como Gassendi y Malebranche, defendieron que estas dos sustancias no tenían ningún punto de contacto. Pero Descartes defendía que se interaccionaban a través de uno, y sólo un órgano, la glándula pineal del cerebro (lámina 4; vol. I, p. 149; *infra*, pp. 375 y ss.). Una razón de la elección de esta glándula consistía en que era el único órgano del cerebro que era uno y no dividido en partes simétricas. Por eso estaba adaptado para interaccionar con todas las partes del cuerpo. Defendía que la cavidad cerebral, en la que

estaba suspendida la glándula pineal, contenía espíritus animales destilados en el corazón a partir de la sangre, y que a través de poros en la superficie interna de esta cavidad los espíritus animales entraban en los nervios, que creía que eran tubos finos huecos. Sostenía que en el interior de cada nervio había cuerdas muy finas, cada una de las cuales estaba atada por uno de sus extremos a la parte del órgano del sentido al que llevaba el nervio, y el otro, a una pequeña puerta en el poro por donde el nervio llegaba a la superficie interna del cerebro. Toda la función nerviosa en esta máquina dependía únicamente del control del flujo de espíritus materiales puramente animales en el cerebro y los nervios, igual, decía, como un órgano musical dependía solamente del control del aire en los tubos.

Por ejemplo, cuando la luz que llegaba desde un objeto externo se centraba sobre la retina, empujaba un conjunto correspondiente de cuerdas del nervio óptico. Estas, a su vez, abrían los correspondientes poros de la superficie interna del cerebro, actuando como alambres de un tirador de campana. La imagen formada en la retina era reproducida así en el modelo de poros abiertos, y era de ese modo trazada en los espíritus sobre la superficie de la glándula pineal. Allí era aprehendida inmediatamente por el alma racional, que recibía así una impresión del objeto exterior. El alma recibía, pues, un signo del mundo exterior, no la cosa misma.

Cuando, por otra parte, el alma quería una acción determinada, actuaba sobre el cuerpo moviendo la glándula pineal de manera que

desviara los espíritus animales hacia los poros que se abrían a los nervios que conducían a los músculos implicados. Los espíritus animales actuaban sobre el músculo al final del nervio fluyendo en él y lo hinchaban, haciéndole mover de ese modo el miembro o parte del cuerpo al que estaba unido.

Descartes pudo, por medio de este modelo hipotético, ofrecer explicaciones mecánicas de muchos fenómenos neurológicos y fisiológicos comunes, por ejemplo, del control coordinado de una acción tal como andar en la que estaban implicados muchos músculos diferentes, o emociones, o imágenes formadas sin objetos externos, o el dormirse y despertarse, de sueños, y de recuerdos, que sostenía eran las trazas físicas de los espíritus animales. Su explicación de la visión y del ojo es especialmente notable por su estrecho control mediante observación y experimento, combinados con el análisis matemático de los fenómenos ópticos implicados.

Al contrario que el hombre, los animales eran meramente autómatas y nada más. Aunque los animales eran considerablemente más complicados, no existía en principio diferencia entre ellos y los *autómata* contruidos por el ingenio humano. «No hay —escribía en una carta al marqués de Newcastle el 23 de noviembre de 1646— ninguna de nuestras acciones externas que puedan dar seguridad a quienes las observan de que nuestro cuerpo es algo más que una máquina que se mueve a sí misma, sino que también tiene en ella una mente que piensa —exceptuando las palabras, u otros signos realizados respecto de los temas que se presentan, sin referencia a ninguna pasión.» Había dicho lo mismo

en el *Discours*. Los ruidos producidos por los animales no indicaban una mente que los controlara y no nos debía engañar su comportamiento aparentemente intencional.

Sé, en verdad, que los animales realizan muchas cosas mejor que nosotros, pero no me asombro; porque eso mismo sirve para probar que obran naturalmente y por resortes, como un reloj, que indica la hora mucho mejor que nuestro pensamiento nos la enseña. Y sin duda, cuando las golondrinas vienen en primavera, actúan en eso como relojes. Y lo que hacen las abejas es de la misma naturaleza.

Los principios mecánicos que Harvey había adoptado como un método fueron convertidos así por Descartes en una completa filosofía de la naturaleza, y del mismo modo que había ignorado el empirismo de Galileo, hizo con el del fisiólogo inglés. Sin embargo, los tres inspiraron a sus sucesores para producir la mecanización de la Biología. La escuela iatromecánica adoptó el principio de que los fenómenos biológicos debían ser investigados enteramente por «principios matemáticos». El estómago era una retorta, las venas y las arterias tubos hidráulicos, el corazón un resorte, las vísceras tamices y filtros, los pulmones fuelles y los músculos y huesos un sistema de cuerdas, armaduras de tirantes y poleas. La adopción de esas ideas abrió muchos problemas a la investigación con métodos matemáticos y experimentales, ya firmemente establecidos; una aplicación particularmente afortunada fue la del estudio de la mecánica del esqueleto y del sistema muscular realizado por

Giovanni Alfonso Borelli en su libro *Sobre el movimiento de los animales* (1680). Pero rápidamente condujeron a grandes ingenuidades que simplificaron excesivamente la complejidad y la variedad de los procesos fisiológicos, en especial los procesos bioquímicos. Además, lo exhaustivo del mecanicismo cartesiano eliminó completamente los fenómenos que no podían ser reducidos inmediatamente a él, en particular la aparente intencionalidad de la conducta animal (por ejemplo, en la construcción de nidos en las aves) y toda la cuestión de la mutua adaptación de las partes y funciones del cuerpo y del todo al medio ambiente. Estos problemas continuaron interesando a los naturalistas, como John Ray (1627-1704), y se convirtieron en un elemento importante de la teología natural, que probaba —no sólo para Ray, sino para científicos físicos, como Boyle y Newton, como expresaba el título del libro de Ray— *La sabiduría de Dios manifestada en las obras de la creación* (*The Wisdom of God manifested in the Works of the Creation*, 1693). Ellos provocaron, en Fisiología, una vuelta a explicaciones más vitalistas; pero es un tributo al poder del genio teórico de Descartes el que la cuestión del vitalismo y del mecanicismo se continuara abordando hasta el siglo XX (algunas veces inconscientemente) según los términos filosóficos establecidos por él y sus críticos en el siglo XVII.

2.4. La extensión de los métodos matemáticos a los instrumentos y máquinas

A medida que avanzaba el siglo XVII, el experimento y el empleo de

las matemáticas se unieron tan estrechamente que un caso como el de Guillermo Gilbert, que realizó sus estudios experimentales sobre el Magnetismo prácticamente sin matemáticas, hubiera sido al final del siglo casi inconcebible. Si las relaciones causales como las descubiertas por Gilbert seguían siendo no susceptibles de ser expresadas en términos matemáticos aun por el mismo Galileo, se creía generalmente que era sólo una cuestión de tiempo el que el problema pudiera ser resuelto y que esto dependía en gran parte del perfeccionamiento de instrumentos de medida más precisos.

El reloj fue uno de los instrumentos que Galileo contribuyó mucho a perfeccionar. Al final del siglo XV se introdujo en Nüremberg el primer reloj movido por un resorte en vez de por pesos, y esto permitió el invento del reloj de bolsillo, como, por ejemplo, los «huevos de Nüremberg». El empleo del resorte introdujo un nuevo problema, porque la fuerza que ejercía disminuía a medida que se desenrollaba. Se diseñaron varios artificios para superar esta dificultad; el que tuvo más éxito fue la llamada espiral, introducida a mediados del siglo XVI por el suizo Jacob Zech. El principio esencial de este artificio era hacer más ahusado progresivamente el tambor de arrastre, de modo que cuando el resorte se desenrollaba, la pérdida de fuerza fuera compensada por un aumento de la fuerza de palanca conseguida al hacer actuar al resorte sobre secciones sucesivamente más anchas del tambor. Sin embargo, no era posible todavía conseguir un reloj que se mantuviera exacto durante un largo período. Esto se iba haciendo necesario para varios menesteres, pero especialmente para la navegación oceánica, que se

había desarrollado desde el final del siglo XV. El único método práctico para determinar la longitud dependía de la comparación exacta de la hora (por el sol) en el barco con la de un punto fijado de la tierra, por ejemplo, Greenwich. Ese reloj fue posible cuando se introdujo un péndulo como mecanismo regulador. En los relojes de bolsillo un resorte espiral cumplía la misma finalidad. Galileo, que había demostrado el isocronismo en 1602; Beeckman y Mersenne, que habían demostrado la relación del período con la longitud en 1634 (cf. *supra*, p. 133), usaron todos ellos el péndulo para medir el tiempo. Galileo propuso un reloj de péndulo, pero el primer reloj exacto fue construido por Huygens alrededor de 1657. Hasta el siglo XVIII no se resolvió el problema de la navegación, al introducir artificios para compensar el movimiento irregular del barco y los cambios de temperatura.

Otra forma de medida en la que las exigencias de la navegación y de los viajes condujeron a grandes mejoras en los siglos XVI y XVII fue el método de trazado de mapas. Los sensacionales viajes de Bartolomé Díaz por el cabo de Buena Esperanza en 1486, de Cristóbal Colón, que llegó a América en 1492; de Vasco de Gama, que llegó a la India en 1497, y de muchos otros marinos en busca de pasos por el Noroeste o el Nordeste, no sólo añadieron un nuevo mundo a la conciencia europea, sino que convirtieron en fundamentalmente necesarios los mapas exactos y los métodos para fijar la posición. El requisito esencial para poner sobre el mapa el globo terrestre era una medida lineal del arco del meridiano, porque había pocas estimaciones astronómicas de la latitud, y

prácticamente ninguna de la longitud, hasta el siglo XVm. Durante los siglos XVI y XVII se realizaron varios perfeccionamientos de las estimaciones medievales de los grados, pero la primera cifra exacta fue dada por el matemático francés Jean Picard en la segunda mitad del siglo XVII. A pesar de las cifras inexactas para los grados, la Cartografía mejoró mucho desde finales del siglo XV. Ello se debió, en primer lugar, al renovado interés por los mapas de la *Geografía* de Ptolomeo (*vide* vol. I, pp. 190-191). Ptolomeo había subrayado la necesidad de la fijación exacta de la posición, y sus mapas estaban dibujados en una completa red de paralelos y meridianos. En el siglo XVI se hicieron cartas de navegación que mostraban áreas mucho más reducidas que las medievales, y en ellas se mostraban las líneas de rumbo de manera simplificada. La brújula fue utilizada para establecer la línea del meridiano; se sabía y se tenía en cuenta el hecho de la variación magnética con la longitud. Petrus Apianus, o Bienewitz, cuyo mapa fue publicado en 1520, fue uno de los primeros en dibujar América, en 1524 escribió un tratado sobre métodos cartográficos y en otra obra, *Cosmographicus Uber*, dio una lista de latitudes y longitudes de muchos lugares del mundo conocido, ilustrado con mapas. Otro cartógrafo del siglo XVI, Gerardo de Cremer o, como era llamado, Mercator de Lovaina, realizó en 1569 la proyección tan conocida que todavía se usa para mostrar la Tierra esférica en un papel de dos dimensiones. Experimentó también con otros tipos de proyección y tuvo cuidado de basar sus mapas o en medidas personales, como en su mapa de Flandes, o en una comparación crítica de la información recogida

por los exploradores. El mismo cuidado mostraron otros cartógrafos del siglo XVI, como Ortelius, que fue geógrafo del rey de España, y Philip Cluvier, que publicó obras sobre la geografía histórica de Alemania e Italia.

Fue en estas materias donde los gobiernos y dirigentes de la época manifestaron más interés hacia la Ciencia y en donde se produjo el mayor contacto entre los científicos y matemáticos de las universidades, por una parte, y los técnicos prácticos —constructores de instrumentos y navegantes—, por otra. Sin ninguna duda, la institución más avanzada interesada por estos problemas fue la *Casa de Contratación*, la gran escuela de navegación establecida desde hacía mucho tiempo en Sevilla, que tanta impresión causó a uno de los capitanes de barco del explorador inglés Richard Chancellor. Pero incluso en un país como Inglaterra, donde en el siglo XVI se traía del continente a los constructores de instrumentos y a los pilotos para hacer avanzar el retraso de los nativos, la empresa privada ayudó a conseguir lo que la falta de patronazgo por parte del gobierno había dejado por hacer. Desde la segunda mitad del siglo, matemáticos como Robert Recordé, John Dee, Thomas y Leonard Digges, Thomas Hood (al servicio del gobierno de la reina Isabel), Henry Briggs (en el Gresham College, de Londres) y Thomas Harriot hicieron esfuerzos para mejorar la educación matemática, en especial la de los maestros técnicos, e incluso dieron enseñanza práctica de los nuevos métodos de navegación. John Dee, por ejemplo, fue encargado de instruir al piloto de Martín Frobisher antes de que

partiera en su primer viaje, en 1576; Thomas Digges pasó varios meses en el mar demostrando los nuevos métodos; y Thomas Harriot acompañó a los colonos de Sir Walter Raleigh a Virginia, en 1585, como «práctico matemático» y consejero.

Para la cartografía terrestre exacta eran esenciales métodos de Agrimensura precisos, y éstos fueron perfeccionados en los siglos XVI y XVII. En la Edad Media se conocía el empleo del astrolabio, del cuadrante y de la ballestilla para medir alturas y distancias; y en el siglo XVI, Tartaglia y otros mostraron cómo fijar la posición y medir la Tierra por medio de la orientación con la brújula y la medida de la distancia. A finales del siglo XV y principios del XVI se hicieron mapas muy exactos, en particular por Waldseemüller de Estrasburgo (1511), de Alsacia, Lorena y del valle del Rin, cuyas carreteras estaban marcadas en millas y mostraban una rosa de los vientos. Se cree que estos mapas fueron hechos con la ayuda de un teodolito primitivo que se llamaba polimetrum. El método de triangulación, por medio del cual se podía realizar la topografía de una región a partir de una línea de base medida exactamente, pero sin necesidad de medidas directas, fue impreso por primera vez, por el cartógrafo flamenco Gemma Frisius, en 1533. En Inglaterra, los primeros mapas precisos fueron hechos por Saxton, al final del siglo XVI, y Norden, a principios del XVII. Una cuestión importante que no encontró solución durante varios años fue la adopción de un meridiano de base común. Los cartógrafos ingleses adoptaron el de Greenwich en el siglo XVII, pero no fue aceptado universalmente hasta 1925.

El primer instrumento para medir la temperatura parece haber sido inventado por Galileo entre 1592 y 1603, pero parece también que otros tres investigadores diseñaron de manera independiente, en la misma época, un termómetro, termoscopio, tubo-calendario o tubo-meteorológico, como se le denominó indistintamente. Galeno había representado el calor y el frío por medio de una escala numérica; y en el siglo XVI, aunque los sentidos eran el único medio para estimar la temperatura, se había hecho común en la literatura médica y en la filosofía de la naturaleza la idea de los grados de esas cualidades (*vide supra*, p. 94). La escala de los 8° para cada cualidad en ella descrita fue una de las utilizadas en los primeros termómetros. Estos instrumentos eran adaptaciones de antiguos inventos griegos. Filón de Bizancio y Herón de Alejandría habían descrito, ambos, experimentos basados en la expansión del aire por el calor (*vide supra*, p. 41, nota 7), y existían versiones latinas de sus obras. La *Pneumática* de Herón fue impresa dos veces en el siglo XVI. Los primeros termómetros, que fueron adaptaciones de algunos de sus aparatos, consistían en un bulbo de vidrio con vástago que se sumergía en el agua de un recipiente. El aire era extraído del bulbo por medio del calor y, al enfriarse, el agua era aspirada por el vástago. El vástago tenía grados marcados y, como el aire, se dilataba y contraía en el bulbo; el movimiento del agua arriba y abajo era una medida de la temperatura, aunque, como ahora sabemos, el agua se movería también con los cambios de presión atmosférica.

La atribución de la prioridad en la invención de este instrumento a

Galileo descansa solamente en el testimonio de sus contemporáneos, porque no está descrito en ninguna de sus obras existentes. La primera exposición impresa se hizo en 1612, en un comentario

a Galeno del fisiólogo Santorio Santorio, que lo utilizó para fines clínicos. Un instrumento parecido, que parece haber sido una modificación del aparato de Filón, fue empleado pocos años más tarde por Robert Fludd para demostrar, según él, los efectos cósmicos de la luz y la oscuridad, y del calor y el frío, para indicar o predecir las condiciones climáticas y para medir los cambios de temperatura. Otro tipo de termómetro, que consistía en un tubo con un bulbo sellado en cada extremo, parece que fue inventado por otro contemporáneo, el holandés Cornelius Drebbell (1572-1634). Este instrumento dependía, para funcionar, de la diferencia entre las temperaturas del aire en cada uno de los bulbos, que hacía mover agua coloreada arriba y abajo por el vástago.

Estos termómetros de aire fueron empleados para diferentes fines en el siglo XVII, aunque principalmente para fines médicos.

J. B. van Helmont (1577-1644), por ejemplo, empleó una modificación del tipo abierto para tomar la temperatura del cuerpo. Eran muy imprecisos, y el tipo abierto particularmente sensible a los cambios de presión atmosférica. El químico francés Jean Rey lo adaptó en 1632 para formar un termómetro de agua que medía la temperatura por medio de la dilatación y la contracción del agua, en lugar del aire; pero las dificultades técnicas impidieron la construcción de un termómetro preciso hasta el siglo XVIII.

El deseo de medir estimuló la invención de un instrumento que pudiera dar alguna idea del peso de la atmósfera, instrumento del que de nuevo Galileo fue en principio responsable. Observaciones como la de que el agua no salía del reloj de agua mientras el orificio superior estaba cerrado fueron explicadas habitualmente, a partir del siglo XIII, o por la «continuidad de la naturaleza universal» de Roger Bacon o por el vacío (*vide supra*, pp. 43-44). Galileo no consideraba el vacío, como los aristotélicos, como una imposibilidad. Produjo el primer vacío artificial del que se tiene noticia sacando un pistón de la base de un cilindro cerrado y, como Gil de Roma, atribuyó la resistencia que encontró a la «fuerza del vacío». Cuando supo que una bomba no elevaba agua más arriba de 32 pies, supuso que esto era el límite de la fuerza. No relacionó esos fenómenos con el peso atmosférico. En 1643 se demostró, por iniciativa de Torricelli, que cuando un largo tubo con uno de sus extremos cerrados se llenaba de mercurio y se invertía, metiendo su extremo abierto en el mercurio de una vasija, la longitud de la columna de mercurio que quedaba en el tubo era menor que la del agua elevada por una bomba proporcionalmente a la mayor densidad del mercurio. El espacio vacío sobre el mercurio se llamó el «vacío de Torricelli», y Torricelli lo atribuyó al peso de la atmósfera. El aparato de Torricelli fue adaptado para hacer el conocido barómetro de tubo en J. Sus conclusiones fueron confirmadas cuando, por indicación de Pascal, se llevó un barómetro hasta la cima del Puy de Dôme y se comprobó que la altura del mercurio disminuía con la altitud, esto es, con el peso de

la atmósfera sobre él.

La posibilidad de hacer el vacío condujo a cierto número de científicos durante los siglos XVI y XVII a intentar diseñar una máquina de vapor práctica. Las primeras de éstas fueron movidas, de hecho, no por la fuerza expansiva del vapor, sino por la presión atmosférica que actuaba después de que el vapor en el cilindro se había condensado, aunque algunos autores, por ejemplo, De Caus en 1615 y Branca en 1629, sugirieron utilizar el artificio de turbina descrito por Herón de Alejandría, un chorro de vapor dirigido a una rueda con palas. El problema práctico más importante para el que se sugería el uso de las máquinas de vapor era el bombeo del agua. El problema de conservar las minas, cada vez más profundas, libres de agua se hizo progresivamente más serio en los siglos XVI y XVII. Agrícola, en su *De Re Metálica*, describió varios tipos de procedimientos utilizados para este fin a principios del siglo XVI: una cadena de cazos arrastrados por un manubrio movido a mano; una bomba aspirante accionada por una rueda hidráulica, con una leva para accionar el pistón y con tubos hechos de troncos de árbol huecos rodeados de bandas de hierro; una bomba impelente accionada por un manubrio; y un artificio de noria de trapos en la que los cangilones eran reemplazados por bolas de crin de caballo y la fuerza motriz suministrada por hombres que movían un molino de escaleras o por un caballo que movía un malacate. Las bombas eran necesarias también para suministrar agua de las fuentes y para el suministro a las ciudades. Augsburgo estaba surtida de agua por una serie de tornillos de Arquímedes movidos por un árbol

motor que elevaban el agua a lo alto de torres, desde las cuales era distribuida por cañerías; Londres se surtía, a partir de 1582, por una bomba impelente movida por una rueda accionada por la marea, colocada cerca del Puente de Londres por el ingeniero alemán Peter Morice, y más tarde por otras bombas movidas por caballos; y se utilizaron bombas para surtir a París y otras ciudades, y para accionar las fuentes de Versalles y Toledo. Ya a principio del siglo XVI, Cardano había estudiado métodos de producir el vacío condensando vapor; y en 1560, G. B. della Porta (1536-1605) sugirió usar un sistema basado en su principio para elevar agua. Esta sugerencia fue propuesta de nuevo en 1663 por el marqués de Worcester. La primera

máquina de vapor que actuaba con un cilindro y un pistón fue diseñada por el ingeniero francés Denis Papin, que había trabajado con Boyle e inventó la bomba condensadora y también la marmita de presión, o «digestor de vapor», como la llamó, con una válvula de seguridad. También diseñó un vehículo movido por vapor. Una máquina de vapor práctica basada en la condensación del vapor fue patentada en 1698 por Thomas Savery; fue utilizada, por lo menos, en una mina y para suministrar agua a varias casas de campo. Al saber esto, Papin diseñó en 1707 una caldera de alta presión con un horno incorporado y un barco de vapor movido por ruedas de palas. Fue este diseño el que adaptó, un poco más tarde, con éxito, Thomas Newcomen para su máquina movida por presión atmosférica; incluso las máquinas de James Watt eran todavía primordialmente atmosféricas. Hacia el final del siglo XVIII se

inventaron máquinas movidas por la fuerza expansiva del vapor a alta presión.

El vacío de Torricelli fue considerado como una refutación definitiva de los argumentos de Aristóteles contra la existencia del vacío que, según algunos de sus seguidores, la «naturaleza aborrecía». Los argumentos contra el vacío, sacados de la ley aristotélica del movimiento, fueron ya refutados por Galileo. Pero el mismo Aristóteles había confundido en ocasiones los argumentos contra la existencia del vacío, en el sentido de la «nada», con los argumentos físicos contra, por ejemplo, la ausencia de un medio resistente. Muchos de sus críticos del siglo XVII hicieron lo mismo. El vacío de Torricelli no era un vacío ontológico del tipo que Descartes, entre otros, no hubiera aceptado. Era un espacio que no contenía, por lo menos teóricamente, aire o cualquier sustancia parecida. Aunque los físicos posteriores no fueron tan sensibles a los matices metafísicos como Descartes, vieron que era preciso postular un *plenum* de algún tipo, y éste siguió jugando una serie de papeles físicos hasta el siglo XX. Torricelli demostró que la luz se transmitía en el vacío; y, comenzando por los efluvios de Gilbert, los físicos del siglo XVII llenaron el vacío con un medio, el éter, capaz de propagar todos los influjos conocidos, como la gravedad, el magnetismo y la luz. El mismo Descartes intentó explicar el magnetismo por torbellinos que, como la *species magnética* de Averroes, entraban por un polo del imán y salían por el otro. Sostenía que éstos actuaban sobre el hierro porque la resistencia de sus partículas al flujo lo atraía hacia el imán. Las sustancias no imantables no

ofrecían esa resistencia.

También durante el siglo XVII se construyeron instrumentos diseñados para observaciones más precisas y medidas más exactas, los más importantes fueron el telescopio y el microscopio compuesto.

La propagación de la luz era explicada todavía por la mayor parte de los ópticos del siglo XVII en términos de la teoría de la «especie», que relacionaban con sus conocimientos de la óptica geométrica. Leonardo da Vinci, Maurolico y Porta se esforzaron por presentar una exposición del funcionamiento del ojo por medio de un conocimiento más perfecto de las lentes y la comparación del ojo con una *camera obscura*. Pero los tres creían todavía que el cristalino del ojo era el órgano sensitivo y que la imagen debía estar erecta y orientada correctamente. La retina fue reconocida por primera vez como órgano sensitivo por el anatomista Félix Plater (1536-1614). Realdo Colombo y Girolamo Fabrici dibujaron el cristalino en la parte anterior del ojo y no en el centro, como se hacía antes. Kepler, en su comentario a Witelo (1604), demostró por vez primera que los rayos concentrados por la córnea y el cristalino formaban una imagen real invertida sobre la retina.

Los árabes habían ya introducido un método apropiado para aislar los astros, observándolos a través de un tubo, y, con la expansión de las gafas, la industria de pulir lentes se había desarrollado en un cierto número de centros. Los matemáticos ingleses Leonard Digges (muerto hacia 1571) y su hijo Thomas realizaron un trabajo de pioneros sobre la combinación de espejos y quizá lentes,

probablemente inspirados en Roger Bacon, pero construyeron su aparato sobre armazón, sin tubos. Parece que un cierto tipo de telescopio con lentes en un tubo fue construido en Italia alrededor de 1590. En todo caso, existe el dato de que un fabricante de gafas holandés, llamado Janssen, copió en 1604 un modelo italiano señalado con esa fecha, y el dato remite a la oscura exposición de Porta, en 1589, de una combinación de lentes cóncavas y convexas. Por alguna razón, Galileo sólo oyó hablar de los instrumentos holandeses, y construyó entonces su telescopio y microscopio compuesto a partir de su conocimiento científico de la refracción⁴⁴. No entendió completamente este fenómeno, y Kepler, en su *Dioptrica* (1611), propuso una teoría más inteligible. La combinación de Galileo, de lentes cóncavas y convexas, fue sustituida por combinaciones de lentes convexas, y con el paso del tiempo se elaboraron reglas para determinar las distancias focales y las aberturas. La auténtica ley de la refracción —la razón de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción es una constante que depende del medio implicado— fue descubierta * en 1610 por Harriot y redescubierta pocos años antes de 1626 por Willibrord Snell (1591-1626). La ley fue también formulada, quizá en primer lugar, de manera independiente, por Descartes, que la **j** publicó por primera vez en su *Dioptrique* en 1637.

Descartes intentó concebir la naturaleza física de la luz en una forma matemática más estricta que sus predecesores. De acuerdo con sus propios principios mecánicos, defendió que la luz consistía en partículas del *plenum* y que se transmitía instantáneamente por

la presión mecánica de una partícula sobre la vecina. Sostenía que el color dependía de la diferencia de velocidad de rotación de las partículas. Cuando presentó la «ley de Snell», lo hizo como si fuera una deducción de este concepto de la naturaleza mecánica de la luz, y en sus *Météores* (1637) ensayó el empleo de esta ley para explicar los dos fenómenos manifestados por el arco iris, el arco circular i brillante y los colores. Los diagramas de Teodorico de Freiberg de la formación de los arcos primario y secundario, mostrando el hecho esencial de la reflexión interna de la luz del Sol en las gotas de lluvia, fueron publicados en Erfurt en 1514, y Antonio de Dominis presentó en 1611 una exposición bastante incorrecta de una explicación similar (*vide* vol. I, pp. 105-107). Es casi seguro que Descartes conocía esta última, si no es que conocía los propios diagramas de Teodorico. Antes de esto, Harriot, en una serie no publicada de experimentos realizados entre 1597 y 1605, había ya medido la dispersión de la luz del Sol en diferentes colores por medio de un prisma de cristal y por medio del agua y otros líquidos, y había utilizado su ley de la refracción para determinar matemáticamente la trayectoria de los rayos que atravesaban las gotas de agua para formar el arco iris. Descartes hizo los mismos cálculos y demostró que los rayos que llegaban al ojo con un ángulo de alrededor de 41 grados, respecto de su dirección original desde el Sol, eran mucho más densos que los que llegaban de otras direcciones y producían así el arco primario. Ambos asociaron claramente los colores con la refrangibilidad diferencial, que Descartes explicaba j por su teoría de las partículas en rotación.

Algún tiempo más tarde, Johann Marcus Marci de Kronland (1595-1667) demostró que los rayos de un color determinado ya no eran dispersados por un segundo prisma. Harriot, Descartes y Marcus fracasaron en elaborar una teoría adecuada de los colores, que tuvo que esperar hasta que sus experimentos con prismas fueron repetidos y ampliados por Newton, con una comprensión teórica del problema muy superior. Los trabajos del siglo XVII y los de Hooke, Huygens y otros sobre la luz permitieron que se construyeran microscopios y telescopios útiles, pero la utilidad de estos dos instrumentos era reducida a causa del fracaso en vencer la aberración cromática, que se hizo grave en el caso de lentes potentes. En los telescopios, el problema de conseguir una ampliación mayor se resolvió utilizando espejos cóncavos, en lugar de lentes; sin embargo, el microscopio efectivamente potente sólo se hizo posible en el siglo XIX.

2.5. La Química

Los progresos que se realizaron en la Química a mediados del siglo XVII fueron resultado más del experimento y de la observación solos que de la interpretación de los hechos en términos de generalizaciones matemáticas. La expansión de la Alquimia y la prosecución de fines más estrictamente prácticos, como la Pintura y la Minería, habían conducido, durante los siglos XIV y XV, a una familiaridad bastante extendida con los aparatos químicos. Aunque éstos incluían la balanza, este instrumento no había sido, como sugería Cusa, combinado con la *inventio*, o descubrimiento, y el

«arte de las latitudes», para elaborar una teoría química cuantitativa. Las drogas minerales habían comenzado a introducirse en la práctica médica y farmacéutica, y, gracias al estudio amplio de ellas, la Química recibió un notable impulso durante las primeras décadas del siglo XVI por parte del pintoresco Philipus Aureolus Theophostus Bombastus von Hohenheim, o Paracelso (1493-1541). Paracelso era un experimentador perfecto y añadió algunos datos al saber químico, por ejemplo, la observación de que mientras los vitriolos se derivaban de un metal, los alumbres se derivaban de una «tierra» (óxido metálico). También aportó a la teoría química los *tria prima*, azufre, mercurio y sal. Los árabes habían sostenido que el azufre y el mercurio eran los principales constituyentes de los metales; pero Paracelso hizo del azufre (fuego, el principio inflamable), del mercurio (aire, el principio fusible y volátil) y de la sal (tierra, el principio incombustible y no volátil) los constituyentes inmediatos de todas las sustancias materiales. Los últimos constituyentes de la materia, de los que estaban compuestos estos *tria prima*, eran los cuatro elementos aristotélicos. Ilustraba esta teoría quemando madera, que daba llamas y humos y dejaba cenizas.

La principal influencia que tuvo Paracelso sobre la Química la obtuvo por su afirmación de que su preocupación primordial no era la transmutación de los metales, aunque defendía que era posible, sino la preparación y purificación de sustancias químicas para ser utilizadas como medicamentos. Después de él, la Química se convirtió en una parte esencial de la formación médica; y durante

casi un siglo, los médicos se dividieron en paracelsistas (o «spagyristas») y «herboristas», que se atenían a los antiguos remedios vegetales. Los primeros fueron a menudo muy imprudentes con los remedios; pero, aunque desastrosa para los pacientes, la iatroquímica (química médica) contribuyó a la Química, como muy bien ilustra la clara y sistemática exposición de técnicas y sustancias presentadas en la *Alchymia* (1597) de Andreas Libavius (1540-1661). El libro de Libavius, como los manuales prácticos de Vanoccio Biringuccio (1480-1539), Agrícola y Bernardo Palissy (1510-hacia 1590) en otros campos de la Química, muestra el progreso del siglo XVI en la recogida de datos.

Johann Baptista van Helmont realizó los primeros perfeccionamientos serios del método, orientado a un análisis de la naturaleza de la materia. Tras graduarse en Medicina en Lovaina, Van Helmont contrajo un matrimonio ventajoso y se estableció para practicar caritativamente su profesión e investigar en su laboratorio. Sus obras, que dejó sin publicar, fueron recogidas después de su muerte y editadas por su hijo con el título de *Ortus Medicinae*. Apareció una traducción inglesa, *Oriatrike or Physick Refined*, en 1662. El empirismo de Van Helmont manifestaba la influencia de los químicos prácticos que le habían precedido y, pese a sus ataques a las escuelas, del nominalismo y del platonismo agustiniano. Sostenía que las fuentes del saber humano eran la iluminación divina y la experiencia sensible. «Los medios de obtener la Ciencia son únicamente rezar, buscar y golpear», decía en el opúsculo «Lógica Inutilis», que forma el capítulo 6 de la *Oriatrike*. En

el estudio de la naturaleza no había verdadera *itiventio*, o descubrimiento, sino «observación pura» de los objetos concretos y mensurables.

Porque cuando alguien me muestra lapis Calaminaris, el preparado de Cadmia o Brasse Oare, el contenido, o lo que está contenido en el cobre, la mezcla y usos del Aurichalcum, o cobre y oro, cosas que no conocía antes, me enseña, me muestra y me da a conocer lo que antes se ignoraba.

Pero la lógica de los filósofos de escuela no conducía a esos descubrimientos. Por sí misma, la «invención lógica es una mera repetición de lo que era conocido antes». Una vez hechas las observaciones, el investigador era conducido por la *ratio*, esto es, la lógica formal y la matemática, a un conocimiento de los principios activos, que eran, en efecto, análogos a la forma sustancial aristotélica y que eran la fuente de la conducta observada. Pero Van Helmont decía que, a menos que ese razonamiento fuera acompañado por la intuición o iluminación, sus conclusiones eran siempre inciertas.

Van Helmont hizo de su teoría del conocimiento la base de una reforma de la enseñanza. «Ciertamente desearía —decía en la *Oriatrike*, capítulo 7, refiriéndose a la enseñanza en las escuelas de Galeno y Aristóteles—

que en un espacio de vida tan corto, la primavera de los jóvenes, no estuviera sazonada de ahora en adelante con tales fruslerías ni con más sofisticada embustera, En verdad deberían aprender

en ese período perdido de tres años, y en todos los siete años, la Aritmética, la Ciencia Matemática, los Elementos de Euclides, y luego la Geografía, con los detalles de mares, ríos, fuentes, montañas, provincias y minerales. Y de la misma forma, las propiedades y costumbres de las naciones, aguas, plantas, criaturas vivientes, minerales y lugares. Además, el empleo del aro y del astrolabio. Y luego, que lleguen al estudio de la naturaleza, que aprendan a conocer y distinguir los primeros principios de los cuerpos... Y todas estas cosas, no por la desnuda descripción del discurso, sino por demostración manual del fuego. Porque, en verdad, la naturaleza mide sus obras destilando, humedeciendo, secando, calcinando, descomponiendo —sencillamente—, por los mismos medios por los que los vidrieros realizan esas mismas operaciones. Y de la misma forma el Artífice, cambiando las operaciones de la naturaleza, obtiene las propiedades y el conocimiento de lo mismo.»

Van Helmont defendió que existían dos «primeros principios» de los cuerpos. Había realizado el experimento de Cusa con la lana (*vide supra*, p. 95), y esto le convenció de que el último constitutivo inerte de las sustancias materiales era el agua. El principio activo que disponía el agua y construía la cosa concreta específica era un «fermento o principio seminal», que era engendrado en la materia por la luz divina (o influjo celeste). Esta llevaba el *archeus*, la causa eficiente que permitía al fermento construir la «semilla», que se

convertía en piedra, metal, planta o animal «porque —como decía en el capítulo 4 de la *Oriatrike*—

la causa eficiente seminal contiene los tipos o modelos o cosas a hacer por él mismo, la figura, movimientos, la hora, relaciones, inclinaciones, adaptaciones, igualdades, proporciones, alienación, defecto y todo lo que cae bajo la sucesión de los días, tanto las tareas de la generación como las de gobierno».

Esos cuerpos eran contruidos de acuerdo con la «idea» del *archeus*. En la generación de los animales, el *archeus faber* de la semilla masculina construía epigenéticamente el embrión a partir de la materia suministrada por la hembra. Las semillas de origen orgánico no eran indispensables, sin embargo, para la generación, y el *archeus* podía producir animales perfectos cuando actuaba sobre un fermento apropiado. Van Helmont defendió de hecho que los padres eran sólo equívocamente causa eficiente de los hijos. Eran únicamente la «ocasión natural» de la producción de la semilla, pero la causa eficiente era Dios. Esta teoría era similar a la de la «ocasionalistas» (*vide infra*, pp. 275-276). Defendía que había solamente dos causas que operaban en los fenómenos naturales, la material y la eficiente.

Van Helmont defendía que existían *archei* y fermentos específicos en el estómago, hígado y en otras partes del cuerpo que controlaban sus funciones; en este aspecto, sus ideas eran completamente galénicas. También sostenía que una enfermedad era una entidad extraña que imponía su modo de vida, o *archeus*, a la del paciente; y

al desarrollar esta idea, se convirtió en un pionero de la etiología y de la anatomía patológica. También pudo, poniendo en práctica la doctrina de que el conocimiento de los fermentos tenía que ser obtenido a partir de la observación de sus efectos materiales, asignar funciones específicas a muchos de los principios galénicos y a otros. Demostró la digestión ácida, o «fermentación», en el estómago y su neutralización por la bilis. Estas eran, decía, las dos primeras fermentaciones de los alimentos que pasaban por el cuerpo. La tercera tenía lugar en el mesenterio; la cuarta, en el corazón, donde la sangre roja se hacía más amarilla por la adición de espíritus vitales; la quinta era la conversión de la sangre arterial en espíritus vitales, principalmente en el cerebro; la sexta era la elaboración del principio nutritivo en cada parte del cuerpo a partir de la sangre. Van Helmont anticipó también algo parecido al principio de la energía específica de los nervios cuando dijo que el espíritu vital comunicaba a la lengua el que pudiera explicar la percepción del gusto, pero que no causaba el gusto en el dedo.

En la química pura, Van Helmont utilizó sistemáticamente la balanza y demostró la conservación de la materia que, según él, las causas secundarias no podían destruir. Mostró que si un cierto peso de silicio era convertido en cristal soluble y éste era tratado con ácido, el ácido de silicio precipitado daría, al ser quemado, el mismo peso de silicio que se había tomado al principio. Mostró también que los metales que se disolvían en los tres ácidos minerales principales podían ser recuperados de nuevo; y se dio cuenta de que cuando un metal precipitaba a otro de una solución de sal, esto no implicaba,

como había creído Paracelso, la trasmutación. Quizá su obra principal fuera sobre los gases. El mismo acuñó el término «gas» del *chaos* griego. Varios autores medievales y posteriores habían reconocido la existencia de «exhalaciones» acuosas y terrosas tanto como aéreas, pero Van Helmont fue el primero en hacer un estudio científico de los diferentes tipos de gases. En este campo, su investigación estuvo muy dificultada por la carencia de un aparato apropiado para recoger los gases. Las diferentes clases de gases que menciona incluían un *gas carbonum* obtenido de la combustión del carbón vegetal (habitualmente, dióxido de carbono, pero también monóxido de carbono); un *gas sylvester* obtenido de la fermentación del vino, por el agua mineral, al tratar un carbonato con ácido acético, y también hallado en algunas cuevas, que apaga la llama (dióxido de carbono); un gas rojo venenoso, al que también llamó *gas sylvester*, obtenido cuando el agua regia actuaba sobre metales como la plata (óxido nítrico); y un *gas pingue* inflamable, formado de la destilación seca de una materia orgánica (una mezcla de hidrógeno, metano y monóxido de carbono). Van Helmont se interesó también por la respiración, cuya finalidad creía que era no el enfriar, como había dicho Galeno, sino el mantener el calor animal; esto se realizaba por medio de un fermento en el ventrículo izquierdo que transformaba la sangre arterial en espíritu vital.

Otros varios químicos realizaron experimentos con gases durante las primeras décadas del siglo XVII, relacionados con el fenómeno de la combustión. Según la teoría aceptada, la combustión implicaba la descomposición de las sustancias compuestas con

pérdida del principio «aceitoso» inflamable presente en el «azufre». El arder tenía, pues, por resultado una pérdida de peso. Sin embargo, se realizaron varias observaciones que condujeron a la elaboración de nuevas ideas sobre este tema. El experimento de la «combustión cerrada», en el que se encendía una vela en un vaso invertido en un recipiente de agua, fue descrito por Filón (*vide supra*, p. 41, nota 7), y Francis Bacon se refirió a él como a un experimento común. Fue repetido por Robert Fludd (1617), y cuando el agua se elevó, al consumirse el aire, describió a éste como «alimentando» a la llama. Los árabes y los químicos del siglo XVI sabían también que durante la calcinación los metales aumentaban de peso. Jean Rey, en 1630, dio argumentos en favor de la creencia de que el «aumento» limitado y definido del peso, que había observado en el caso de las cenizas del plomo y del estaño, podía provenir solamente del aire que, según él, se mezclaba con las cenizas y se adhería a sus más pequeñas partículas. Defendía, además, que todos los elementos, incluido el fuego, tenían peso y que este peso se conservaba a través de los cambios químicos. Estos hechos e ideas eran completamente incompatibles con la teoría del principio «aceitoso»; y cuando este principio se convirtió en «flogisto», se le tuvo que considerar como teniendo un peso negativo. Sin embargo, no fue hasta el final del siglo XVIII, cuando la combustión se asoció estrechamente con la oxidación, cuando se convirtió en la cuestión central de la revolución química iniciada por Lavoisier y sus contemporáneos. El mecanismo universal que acompañó a los éxitos de la física matemática se introdujo en la Química gracias al desarrollo de la

teoría atomista. Filósofos de la naturaleza, como Bruno, que argumentó en favor de la existencia real de *mínima* naturales o físicos, continuaron las discusiones escolásticas sobre este problema; y Francis Bacon le dio preeminencia, aunque cambió luego de parecer, al adoptar al principio una opinión favorable hacia los átomos, afirmando que el calor era un estado producido por la vibración de los corpúsculos. Galileo dijo del cambio de las sustancias que «muchos se realizan por una simple trasposición de partes». La primera aplicación de la teoría atomista a la Química fue hecha por el holandés Daniel Sennert (1572-1637). Sennert defendió que las sustancias sujetas a la corrupción y a la generación debían estar compuestas de cuerpos simples, de los que surgían y en los que se resolvían. Estos cuerpos simples eran *mínima* físicos y no meros *mínima* matemáticos, y eran de hecho átomos. Postuló cuatro clases diferentes de átomos, que correspondían a cada uno de los elementos aristotélicos, y elementos de segundo orden (*prima mixta*), producidos por los elementos aristotélicos al combinarse. Sostenía, por ejemplo, que los átomos de oro en solución en ácido o del mercurio en la sublimación, retenían su individualidad al combinarse, de modo que las sustancias originales podían obtenerse de nuevo a partir de los compuestos. Joachim Jung (1587-1657) expresó ideas parecidas, y por mediación suya llegaron más tarde a conocimiento de Robert Boyle (1627-1691).

Descartes también hizo contribuciones a la teoría atomista porque, aunque no creía en los *mínima* físicos indivisibles, intentó extender

sus principios mecanicistas a la Química, atribuyendo las propiedades de varias sustancias a la forma geométrica de sus partículas terrosas constituyentes. Por ejemplo, supuso que las partículas de sustancias corrosivas, como los ácidos, eran como hojas de bordes afilados, mientras que las de los aceites eran arborescentes y flexibles. John Mayow (1643-1679) utilizó más tarde estas ideas y se hicieron familiares a los químicos gracias al *Cours de Chymie* (1675) de Nicolás Lémery (1645-1715). Otro geómetra, Gassendi, popularizó los átomos de Epicuro (1649), defendiendo, sin embargo, que no habían existido eternamente, sino que habían sido creados por Dios con sus cualidades características. Basó su creencia en la existencia del vacío en el experimento de Torricelli y, como Descartes, relacionó las propiedades químicas con la forma de los átomos. También atribuyó la combinación de *moleculae* o *corpusculae* a mecanismos como los de los corchetes y corchetas. El sistema de Gassendi fue tema de estudio de una obra de Walter Charleton (1654), médico de Carlos II y uno de los primeros miembros de la Royal Society. El microscopio despertó el interés por descubrir la dimensión de los átomos, y Charleton aseguraba, partiendo de fenómenos como la volatilización y la solución, que la partícula más pequeña observable al microscopio contenía diezcenas de millares de millones de partículas invisibles. A través de Charleton, la teoría atomista fue muy conocida en la Inglaterra de mediados del siglo XVII. Cuando fue adoptada por Boyle y Newton, las concepciones empíricas de Van Helmont y los químicos prácticos anteriores se transformaron de acuerdo con los principios

mecánicos, y la Química, como la Física, se puso definitivamente en camino de ser reducida a la ciencia matemática. Tras el descubrimiento de la «combinación de pesos» y de la generalización de Dalton de los resultados de su teoría atómica a principios del siglo XIX, se hizo inevitable la realización de este proceso.

2.6. La botánica

Los estudios de Botánica se limitaron, hasta mediados del siglo XVII, principalmente a la tarea de recoger y clasificar datos, y apenas fueron influidos por la Revolución matemática del pensamiento científico. De hecho, aun en el siglo XX, la Botánica, como muchas otras ramas de la Biología, continúa siendo particularmente reacia al tratamiento matemático. La teoría por la que el mundo animado encontró finalmente una explicación universal, la teoría de la evolución orgánica, se basaba más en abstracciones lógicas que en abstracciones matemáticas.

El doble interés de los médicos por la botánica descriptiva y por la Anatomía, que continuó durante el siglo XVI, hizo que éstos fueran los primeros aspectos de la Biología en ser estudiados y que su estudio fuera casi enteramente obra de los médicos. En algunos lugares, como en Montpellier, era costumbre tener un curso de Botánica en verano y uno de Anatomía en invierno. Los primeros libros de Botánica que se imprimieron eran casi todos herbarios. Los mejores de éstos, como el *Herbario latino* (1484), que había existido antes con toda probabilidad en manuscrito, y el *Herbario alemán* (1485), además de ser compilaciones de los autores clásicos,

árabes y latinos medievales, incluían también descripciones e ilustraciones de plantas locales, por ejemplo, de Alemania. Rufinus, el mejor de los herboristas latinos medievales conocidos, parece, sin embargo, haber sido olvidado.

Además del interés medicinal en identificar las plantas para usarlas como remedios, los médicos del siglo XVI compartieron con los lexicógrafos el interés humanista por identificar las plantas mencionadas en las obras impresas hacia poco de Plinio (1469), Aristóteles (1476), Dioscórides (1478) y Teofrasto (1483). Más de un naturalista humanista, de los que el suizo Conrad Gesner (1516-1565) es un ejemplo típico, comenzaron intentando encontrar e identificar en su propio país, con fines de crítica textual, las plantas y animales mencionados por los autores clásicos, y a partir de esto desarrollaron un interés por la fauna y flora locales. El extraordinario interés que estaban suscitando los animales, plantas, piedras, entre estas personas a mediados del siglo XVI, se manifiesta por la enorme correspondencia sobre este tema, con descripciones de expediciones locales y la transmisión de ejemplares, dibujos y descripciones, mantenida por Gesner y otros naturalistas. Pronto se constató que, como Alberto Magno y Rufinus ya vieron, existían otras criaturas además de las conocidas por los antiguos. Las limitaciones clásicas se vieron desbordadas por la nueva flora, fauna, alimentos y medicamentos que llegaban a Europa desde el Nuevo Mundo y del Oriente. Se describieron entonces las plantas y animales y se los dibujó por su propio interés, y se les denominó en su mayor parte por sus nombres

comunes vernáculos, sin referencia a los clásicos.

El primer resultado de esta actividad botánica del siglo XVI, que fue mayor en Alemania, Holanda, en el sur de Francia y en Italia, fue aumentar el número de plantas individuales conocidas. Se hicieron listas de la flora y fauna locales por distintas regiones. Se crearon jardines botánicos, que desde hacía mucho tiempo habían existido en los monasterios y que desde el siglo XIV habían sido plantados por algunas escuelas de Medicina, en ciudades universitarias como Padua (1545), Bolonia (1576) y Leyden (1577). Los dos últimos estaban dirigidos, respectivamente, por Aldrovandi y Cesalpino y por De l'Ecluse. Más tarde se crearon otros en Oxford (1622), París (1636) y otros lugares. La práctica de conservar plantas secas, «jardines secos», que se inició en Italia, permitió que la Botánica pudiera continuar durante los meses de invierno. Al mismo tiempo, el botánico portugués García da Orta publicó un libro sobre las plantas hindúes de Goa (1536) y el español Nicolás Monardes las primeras descripciones del «tabaco» y otras plantas americanas.

En la escuela septentrional, cuyo interés era únicamente por las flores, se puede seguir el continuo progreso de las ideas botánicas desde los cuatro «padres» de la botánica alemana hasta Gaspard Bauhin. El propósito primordial de todos los miembros de esta escuela era, sencillamente, hacer posible identificar las plantas individuales silvestres o cultivadas y distinguirlas de las parecidas. Ello condujo a concentrar la atención en la exactitud de las ilustraciones y descripciones. Las ilustraciones, que en el caso del herbario de Otto Brunfels (1530), el primero de los padres alemanes,

las realizó Hans Weiditz, un artista de la escuela de Alberto Durer (1471-1528), fueron desde el principio muy superiores a las pedantes descripciones clásicas. Con Jerome Bock (1539) y Valerius Cordus (1561) comenzaron progresivamente a ser más perfectas. El fin de la descripción y la ilustración era, sencillamente, pintar los aspectos más fácilmente reconocibles de la apariencia externa, como la forma y disposición de las raíces y ramas, la forma de las hojas y el color y la forma de las flores. No existía ningún interés por la morfología comparada de las partes. Por ejemplo, el glosario de términos dado por el tercer padre alemán, Leonard Fuchs (1542), se refería casi enteramente a esos aspectos; y los primeros intentos de clasificación, por ejemplo, los de Bock y el holandés Robert Dodoens (1552), se basaban en su mayor parte en características artificiales, como si era o no comestible, el olor o las propiedades medicinales. Debido a que la tarea de describir las formas individuales implicaba necesariamente el distinguirlas de relaciones próximas, era inevitable alguna apreciación de la afinidad «natural». Gesner, cuya obra botánica no fue publicada, por desgracia, hasta mucho después de su muerte, y que tuvo así, aparentemente, poca o ninguna influencia sobre sus contemporáneos, distinguía cuatro especies diferentes de un género determinado, por ejemplo, la genciana, y también parece haber sido el primero en llamar la atención sobre la flor y el fruto como caracteres de identificación. Otros autores, como Dodoens y Charles de Plécluse (1576), aunque preocupados principalmente en poner en orden su obra, colocaron juntas dentro de cada división artificial plantas que pertenecían a lo

que ahora se reconoce como grupos naturales. Esta práctica fue llevada todavía más lejos por Matías de Lobel (1571), graduado de Montpellier como De l'Ecluse, que basó su clasificación principalmente en la estructura de la hoja. Alcanzó su etapa final con Gaspard Bauhin (1560-1624), profesor de Anatomía en Basilea. Las descripciones de Bauhin son precisas y fruto de una identificación, como se puede observar en la de la remolacha, que él llamaba *Beta Crética semine aculeato*, dada en su *Prodomus Theatri Botaniá* (1620):

De una raíz corta y ahusada, no fibrosa, salen varios tallos de alrededor de 18 pulgadas de largo, se arrastran por tierra y son de forma cilíndrica y arrugada, se hacen progresivamente blancas cerca de la raíz, con una ligera capa de vello, y se esparcen en pequeños ramos. La planta tiene pocas hojas, similares a las de la Beta nigra, excepto en que son más pequeñas y que tienen largos pecíolos. Las flores son pequeñas, de un amarillo verdoso. Los frutos se pueden ver creciendo en gran número cerca de la raíz, y desde este punto se esparcen a lo largo del tallo y casi a todas las hojas. Son ásperos, tuberculados y separados en tres puntos encorvados. En cada cavidad está contenida una semilla de la forma de un Adonis; es ligeramente redonda y acaba en punta, y está cubierta de una doble capa de membrana rojiza, la interior envuelve un corazón blanco harinoso.

El número de plantas descritas por Bauhin se elevaba a 6.000,

comparadas con las 500 que daba Fuchs. Utilizó sistemáticamente una nomenclatura binomial, aunque no inventó este sistema, pues ya había aparecido en un manuscrito del siglo XV, del *Circa Instans*. En su *Pinax Theatri Botaniá* (1623) hizo una exposición exhaustiva de los sinónimos empleados por los botánicos anteriores. Al enumerar las plantas descritas, procedía, como había hecho De Lobel, partiendo de las formas supuestamente menos perfectas, como las hierbas y la mayor parte de las liliáceas, pasando por las hierbas dicotiledóneas hasta los arbustos y árboles. El y De Lobel hicieron la distinción práctica entre monocotiledóneas y dicotiledóneas y, de la misma forma que habían hecho algunos de sus predecesores en grados diferentes, pusieron juntas plantas que pertenecían a familias, como las crucíferas, umbelíferas, papilionáceas, labiadas, compuestas, etc. Ese agrupamiento se basaba enteramente, sin embargo, en una apreciación intuitiva de la semejanza de la forma y hábito. No existía ningún reconocimiento consciente de la morfología comparada, y no se propuso ningún sistema basado en la comprensión y análisis de los rasgos morfológicos. El esfuerzo principal de la escuela septentrional se dirigió, de hecho, a acumular cada vez más descripciones empíricas, hasta que a fines del siglo XVII John Ray (1682) pudo citar 18.000 especies. La persona que hizo posible reducir esta masa de información a un cierto tipo de orden racional fue el italiano Andrea Cesalpino, profesor de Medicina primero en Pisa y luego en Roma, donde era también médico del Papa Clemente VIII. Cesalpino aportó a la Botánica no sólo el conocimiento floral de los botánicos, sino

también un interés por la morfología detallada de las partes independientes de las plantas y una mente aristotélica capaz de hacer generalizaciones. Basó su intento, expuesto en el *De Plantis* (1583), de explicar las afinidades «reales» o «sustanciales» entre las plantas en el principio aristotélico de que la causa final de la actividad vegetativa era la nutrición, de la que la reproducción de la especie era una simple extensión. En su tiempo se desconocía todavía el papel de la hoja en la nutrición, y se suponía que los materiales nutritivos eran absorbidos del suelo por las raíces y llevados por las venas hasta el tallo para producir el fruto. El centro del calor vital, correspondiente al corazón de los animales, era el meollo, y Cesalpino sostenía que era también a partir del meollo de donde se producían las semillas. La cooperación de las partes masculinas y femeninas de las flores en la reproducción no había sido aún descubierta, y suponía que la flor era, simplemente, un sistema de envolturas protectoras alrededor de la semilla, comparable a las membranas fetales de los animales. Según esos principios, dividió las plantas: primero, según la naturaleza del tallo que conducía los materiales nutritivos, en plantas leñosas y herbáceas, y dentro de estos grupos, según los órganos de la fructificación. En este punto comenzó con plantas como los hongos, que sostenía que no tenían semilla, sino que se engendraban espontáneamente de las sustancias en corrupción; de ahí pasa a los helechos, que se propagaban por una especie de «lana», y luego las plantas con verdaderas semillas. Clasificó entonces estas últimas según el número, posición y forma de las partes del fruto, con

subdivisiones basadas en las raíces, tallo y hoja. Pensaba que las características como el color, el olor, el gusto o las propiedades medicinales eran meros accidentes.

El intento de Cesalpino de deducir una clasificación «natural» de los principios que había supuesto condujo a resultados deplorables. La distinción entre monocotiledóneas y dicotiledóneas era menos clara que con los herboristas, y de las 15 clases que hizo, sólo una, las umbelíferas, corresponde a lo que ahora sería reconocido como un grupo natural. Sin embargo, su sistema se basaba en un saber considerable y en principios claros que, aunque erróneos, iban a ser introducidos por primera vez por los botánicos de la época en el estudio de las plantas. Sus seguidores tenían algo sobre lo que trabajar. El primero en criticar y desarrollar las ideas de Cesalpino fue Joachim Jung (1587-1657), un profesor alemán de Medicina que probablemente se puso en contacto con sus ideas en Padua. Jung aceptó la idea de que la nutrición era la función vegetativa fundamental y, como Cesalpino, basó su idea de la especie en la reproducción. Realizó lo que desde entonces fue un gran avance al estudiar la Morfología lo más independientemente posible de las cuestiones de Fisiología.

Teofrasto, cuya *Historia Plantarum* había sido traducida al latín por Teodoro de Gaza (1483), había dado descripciones morfológicas de las partes externas de las plantas desde la raíz a los frutos. También propuso la «homología» de los miembros del perianto de las flores, vigiló el desarrollo de las semillas y, hasta cierto punto, distinguió las monocotiledóneas y dicotiledóneas. Su interés no se limitó en

absoluto a la Morfología. Realizó un intento de comprender la relación entre la estructura y la función, entre los hábitos y la distribución geográfica, y describió la fertilización de la palmera datilera, e intentó entender la cabrahigadura de la higuera, aunque las flores fueron distinguidas solamente por Valerius Cordus. Teofrasto sentó también los primeros rudimentos de la nomenclatura de las plantas, y prácticamente no hubo más progresos en este campo hasta que Jung hizo descripciones morfológicas y distinciones similares.

Las definiciones precisas de Jung de las partes de las plantas, para las que utilizó los refinamientos lógicos desarrollados por los escolásticos tardíos y sus propias dotes matemáticas, fueron el fundamento de la subsiguiente morfología comparada. Por ejemplo, definió el tallo como la parte superior de la planta que se extendía hacia lo alto por encima de la raíz, de la misma forma que ésta hacia abajo, que no se podía distinguir en él el frente y los lados, mientras que en una hoja las superficies limitadoras de la tercera dimensión (aparte de la longitud y la anchura) hacia la que se extendía desde su punto de origen eran diferentes una de otra.

Las superficies interna y externa de una hoja estaban así distintamente organizadas, y esto, tanto como el hecho de que cayeran en otoño, permitía que las hojas compuestas pudieran ser diferenciadas de las ramas. Los botánicos no estaban preparados todavía para seguir esta dirección, y ni Jung ni Cesalpino tuvieron mucho influjo sobre sus contemporáneos, que siguieron dedicando sus energías a las descripciones empíricas. Fue solamente a final

del siglo XVII cuando los botánicos reconocieron una vez más la necesidad de un sistema «natural» de clasificación e intentaron fundamentarlo en la morfología comparada. La culminación de sus esfuerzos fue el sistema de Linneo (1707-1778), que reconoció su deuda respecto de Cesalpino y Jung. Cuando la clasificación «natural» llegó por sí misma a exigir una explicación, ésta le fue suministrada por la teoría de la evolución orgánica.

2.7. La anatomía y la morfología y embriología animales comparadas

Los grandes progresos realizados por la Anatomía y la Zoología durante el siglo XVI y principios del XVII se debieron, como los de la Botánica, simplemente a una nueva precisión de las observaciones, y permanecieron en su mayor parte sin ser afectadas por la Matemática. De la misma manera que la botánica del siglo XVI se inició con el propósito de identificar las plantas médicamente útiles, también la Anatomía comenzó con aspeaos que podían facilitar el trabajo de los cirujanos y de los artistas. Lo que requerían las necesidades prácticas de los cirujanos era principalmente buenas descripciones topográficas; la morfología comparada presentaba poco interés para ellos. Los pintores y escultores, de algunos de los cuales se sabe que utilizaron el escalpelo, como Andrea Verrocchio (1435-1488), Andrea Mantegna (muerto en 1516), Leonardo da Vinci, Durero, Miguel Angel (1475-1564) y Rafael (1483-1520), necesitaban poco más que la Anatomía superficial y un conocimiento de los huesos y de los músculos. A medida que avanzó

el siglo, sin embargo, fue surgiendo un mayor interés por cuestiones funcionales y por la estructura y hábitos de los animales. En ambos aspectos, el factor de progreso, que no fue el menos importante, consistió en la brillante revolución aportada por los mismos artistas en la ilustración anatómica.

El artista que ha dejado más pruebas de sus ejercicios anatómicos es Leonardo da Vinci y, como en la Mecánica, sus investigaciones fueron más allá de las necesidades prácticas de su arte. Incluso planeó un manual de Anatomía en colaboración con el profesor de Pavía Marcantonio della Torre (hacia 1483-1512), que murió antes de que el libro fuera escrito. Leonardo se guió por manuales anteriores y repitió algunos de los antiguos errores, como el dibujar el cristalino en el centro del ojo. Su pretensión de apoyarse siempre en la experiencia debe ser aceptada dentro del mismo espíritu que la misma pretensión declarada por muchos de sus predecesores. Realizó varias observaciones personales sobre anatomía humana y comparada, llevó a cabo experimentos fisiológicos que fueron a menudo provechosos y siempre ingeniosos. Fue uno de los primeros en utilizar disecciones seriadas. Los animales que menciona como sujetos de sus investigaciones incluían el *Gordius*, las polillas, las moscas, los peces, las ranas, el cocodrilo, los pájaros, el caballo, el buey, la oveja, el león, el perro, el gato, el murciélago y el mono. Sus mejores dibujos fueron de los huesos y los músculos, siendo clara y sustancialmente exactos los de la mano y el hombro. Otros mostraban la acción de los músculos. Hizo modelos con huesos y alambres de cobre, y señaló que la fuerza del bíceps del brazo

depende de la posición de su inserción respecto de la mano. Comparó los miembros del hombre y el caballo, mostrando que este último se movía sobre las puntas de sus falanges. Estudió el ala y la pata de las aves, la mecánica del vuelo y la operación del diafragma en la respiración y la defecación. Estudió el corazón y los vasos sanguíneos. También realizó buenos dibujos de la placenta de la vaca, pero no tenía certeza sobre si las corrientes sanguíneas maternal y fetal estaban relacionadas o no. Una de sus proezas más ingeniosas fue la de hacer moldes de cera de los ventrículos del cerebro. También realizó experimentos sobre la medula espinal de la rana, y concluyó que este órgano era el «centro de la vida».

Leonardo hizo una contribución más a la Biología y a la Geología cuando empleó conchas de tierra adentro para apoyar la teoría de Alberto de Sajonia sobre la formación de las montañas (cf. vol. I, páginas 120-121). Preguntaba: «¿por qué encontramos los huesos de grandes peces y ostras y corales y otras varias conchas y caracoles marinos sobre las altas cimas de las montañas cercanas al mar de la misma forma que las encontramos en los fondos marinos?»⁴⁵.

En Italia había existido un interés continuado por la geología local desde el siglo XIII, y Leonardo utilizó en sus especulaciones sobre Geología sus propias observaciones de la costa marina, los Alpes y sus torrentes y los ríos de la Toscana, como el Amo. Rechazó las teorías de que los fósiles no eran los restos de seres vivos, sino accidentes o «juegos» de la naturaleza o habían sido producidos espontáneamente por influjo astral, manteniendo que eran restos

orgánicos que habían sido transportados de cualquier parte por el Diluvio. Aceptó en su lugar la teoría de Avicena de la formación de los fósiles que había aprendido de Alberto Magno. Sostenía, pues, que la disposición de las conchas en estratos, con formas gregarias como ostras y mejillones en grupos, y formas solitarias separadas de la misma manera que se encontraba en las que vivían en la costa marina, y con pinzas de cangrejos, conchas con las otras especies pegadas a las suyas, y los huesos y dientes de peces mezclados juntos, sugería que los fósiles eran restos de animales que habían vivido anteriormente en el mismo lugar, exactamente igual que lo hacían los animales marinos contemporáneos. Las montañas en las que se encontraban esas conchas habían formado anteriormente el fondo del mar, que se había elevado, y se elevaba todavía, gradualmente debido a los depósitos fangosos de los ríos.

Las conchas, ostras y otros animales semejantes que se originan en el barro marino atestiguan los cambios de la tierra alrededor del centro de nuestros elementos. La prueba es ésta; los grandes ríos van siempre turbios debido a la tierra, que es agitada por la fricción de sus aguas en el fondo y en sus orillas; y este frotamiento altera la superficie de los estratos formados de capas de conchas, que yacen sobre la superficie del fango marino y que se produjeron allí cuando las aguas saladas las cubrían; y estos estratos fueron cubiertos de nuevo de un tiempo a otro con barro de diferente espesor, o arrastrados al mar por los ríos e inundaciones de mayor o menor extensión; y así, estas conchas permanecieron aprisionadas y muertas bajo estas

capas de barro elevadas a tal altura que salieron desde el fondo al aire. En el tiempo presente, esas bases son tan altas que forman colinas o altas montañas, y los ríos que lamen los lados de estas montañas descubren los estratos de esas conchas; y así, el lado reblandecido de la tierra se eleva continuamente, y las antípodas se hundan más cerca del centro de la tierra, y los antiguos fondos del mar se han convertido en crestas montañosas⁴⁶.

Los progresos quirúrgicos del siglo XV, que recibieron nuevo impulso tras la impresión de la obra *De Medicina* de Celso en 1478, condujeron primeramente a descubrimientos anatómicos con la descripción de Alejandro Achillini (1463-1512), en su comentario sobre Mondino, del «canal de Wharton», de la entrada del canal de la bilis en el duodeno y de los huesos martillo y yunque del oído medio. El claro influjo del arte naturalista sobre la ilustración anatómica se observa por primera vez en la obra italiana *Fascículo di Medicina* (1493), mientras Berengario da Carpí (muerto en 1550), profesor de Cirugía en Bolonia, fue el primero en imprimir figuras para ilustrar su texto. Berengario, en su comentario a Mondino (1521), describió también un cierto número de observaciones originales. Demostró experimentalmente que el riñón no es un tamiz, porque cuando se le inyectaba agua caliente con una jeringa solamente se hinchaba y no pasaba agua a su través. Mostró de una manera similar que la vejiga de un feto de niño de nueve meses no tenía otra abertura que la de los poros urinarios. También negó la

existencia de la *rete mirabile* en el hombre, realizó la primera exposición clara del apéndice vermiforme, de la glándula del timo y de otras estructuras, tuvo cierta idea de la acción de las válvulas cardíacas y acuñó el término *vas deferens*. Otro cirujano de la misma época que tenía un conocimiento práctico de la Anatomía fue Nicolás Massa, que publicó una obra sobre el tema en 1536. El primero en publicar ilustraciones de todo el sistema arterial, nervioso y otros sistemas (1545) fue Charles Estienne (1503-1564), de la conocida familia de los impresores humanistas franceses. Siguió también los vasos sanguíneos hasta el interior de la sustancia de los huesos, señaló las válvulas en las venas y estudió el sistema vascular inyectando aire en los vasos. Otra obra que manifiesta los avances de la Anatomía realizados durante las primeras décadas del siglo XVI es el opúsculo publicado por Giambattista Canano (1515-1579) en 1541, en el que mostraba cada músculo por separado en su relación con los huesos.

Además de estos progresos en el conocimiento de la Anatomía, se realizaron un cierto número de avances en la cirugía práctica del siglo XVI. Uno de los mayores problemas para un cirujano militar era cómo tratar las heridas por arma de fuego. Al principio se creía que éstas eran venenosas y se las trataba escaldando con aceite de saúco, con resultados terribles. Uno de los primeros médicos en abandonar esta costumbre fue Ambrosio Paré (1510-1590), que describió en su fascinante *Voyages en divers lieux* cómo tuvo que curar a tantos hombres después del ataque a Turín en 1537, cuando estaba al servicio del rey Francisco I de Francia, en que se

acabó el aceite. A la mañana siguiente se asombró al constatar que los hombres que no habían sido tratados con el aceite estaban mucho mejor que aquellos cuyas heridas habían sido escaldadas con aceite, y desde entonces abandonó esa costumbre. Paré dio también una buena exposición del tratamiento de las fracturas y dislocaciones y de la herniotomía y otras operaciones. En la Europa septentrional la Cirugía estaba todavía en manos de barberos y cortadores relativamente sin instrucción, aunque algunos de éstos tenían una considerable destreza. El litotomista itinerante Pierre Franco, por ejemplo, fue el primero en realizar la litotomía suprapúbica para extirpar piedras de la vejiga. En Italia la Cirugía estaba en manos de los anatomistas con formación universitaria, como Vesalio y Girolamo Fabrici, beneficiándose así de los logros del saber académico. La obra de cirugía plástica, que comenzó en el siglo XV, prosiguió en el XVI por obra del boloñés Gaspere Tagliacozzi, que restauró una nariz desprendida trasplantando un trozo de piel del brazo, dejando un extremo unido todavía al brazo hasta que el injerto en la nariz se hubo afianzado.

Mientras que estos anatomistas y cirujanos extendían las realizaciones prácticas de sus predecesores, los médicos de otro grupo estaban intentando, como en otras ciencias, volver a la Antigüedad. Los primeros médicos humanistas, como Tomás Linacre (hacia 1460-1524), médico de Enrique VIII, tutor de la princesa María y fundador y primer presidente del Colegio de Médicos, o Johannes Günther (1487-1574), que contó en París como discípulos suyos a Vesalio, Servet y Rondelet, eran más hombres de

letras que anatomistas. Alentaron y cooperaron en hacer nuevas traducciones al latín de Galeno e Hipócrates, que fueron impresas, junto con las antiguas, en numerosas ediciones desde finales del siglo XV. Dedicaron sus esfuerzos a establecer el texto de estos autores más que a la observación, y Mondino les parecía discutible, no tanto por no estar de acuerdo con la naturaleza como por no concordar con Galeno. También iniciaron un violento ataque contra la terminología árabe latinizada de Mondino, a la que «purificaron» sustituyendo las palabras árabes por latín o griego clásicos, transformándola en la terminología anatómica todavía en uso.

Fue en este ambiente de observación práctica y de prejuicio humano e investigación literaria donde el llamado padre de la anatomía moderna, el holandés Andrés Vesalio (1514-1564), inició su obra. En ella manifiesta ambos rasgos. El *De Humani Corporis Fabrica* (1543) puede ser considerado como la aparición de un intento de restaurar tanto la letra como las normas de Galeno. En él Vesalio seguía a Galeno, lo mismo que a otros autores respecto de los cuales no reconoció su deuda, en muchos de sus errores tanto como en sus observaciones verdaderas. Situó el cristalino en el centro del ojo, repitió los errores de Mondino sobre los órganos reproductores, representó el riñón como un tamiz y formuló algunas conclusiones sobre la anatomía humana a partir del estudio de los animales, costumbre por la que criticó a Galeno. Además, no difería de Galeno en ningún aspecto importante de la Fisiología. Compartió la visión de su maestro griego para poner de relieve la función viviente en la estructura anatómica. Según Galeno, la función de un órgano era la

causa final de su estructura y de su acción mecánica y, por tanto, la explicación de su presencia. La inspiración de la investigación anatómica que él estimuló era totalmente teleológica, y el mismo Vesalio consideró al cuerpo humano como el producto de la destreza divina. Esto debe ser tenido en cuenta como un factor importante de la pasión con que realizó sus disecciones. Pero fueron las ilustraciones el rasgo auténticamente revolucionario del *De Fabrica*. Ningún dibujo anatómico puede compararse con ellas, excepto las no publicadas de Leonardo; los dos son la prueba más brillante de cuán estrechas eran las relaciones entre la biología descriptiva y el arte naturalista. Sin embargo, las ilustraciones del *De Fabrica* van más allá del mero naturalismo; la asombrosa serie que representa la disección de los músculos es a la vez una exhibición detallada de las relaciones entre la estructura y la función de los músculos, tendones, huesos y articulaciones, y una danza de la muerte, un drama representado por un cadáver suspendido de un gancho sobre el telón de fondo de un paisaje continuo en las colinas Euganeas. No se ha determinado definitivamente de quién era la obra de las ilustraciones del *De Fabrica* y del volumen compañero del *Epitome* (publicado con él en Basilea en 1543), pero es prácticamente cierto que salieron del taller de Tiziano, y que entre los artistas que trabajaron en ellas bajo la supervisión del maestro se encontraba el mismo Vesalio.

La obra de Vesalio contenía, con mucho, las descripciones e ilustraciones más detalladas y extensas hasta entonces publicadas de todos los sistemas y órganos del cuerpo. Aunque su exposición

de los otros órganos no los compara habitualmente con la de los huesos y músculos, cuya relación ilustró muy bien, realizó, sin embargo, un gran número de nuevas observaciones sobre las venas, arterias y nervios, amplió considerablemente el estudio del cerebro, aunque sin rechazar enteramente la *rete mirabile*, y mostró que no se podía hacer pasar crines a través del septo interventricular del corazón. También repitió varios de los experimentos de Galeno sobre animales vivos y mostró, por ejemplo, que la sección del nervio recurrente laríngeo provocaba pérdida de voz. Mostró que un nervio no era un tubo hueco, aunque los fisiólogos continuaron creyendo lo contrario hasta el siglo XVIII. También mostró que un animal cuya pared torácica había sido atravesada podía ser conservado vivo inflando los pulmones con fuelles.

Un contemporáneo de Vesalio, al que podría considerarse también como uno de los fundadores de la anatomía moderna si sus ilustraciones anatómicas se hubieran editado cuando fueron realizadas en 1552 en vez de 1714, fue el romano Bartolomeo Eustachio (1520-1574). Introdujo el estudio de las variaciones anatómicas, en particular en el riñón, y realizó ilustraciones excelentes de los huesecillos del oído, de las relaciones de los bronquios y los vasos sanguíneos en los pulmones, del sistema nervioso simpático, de la laringe y del canal torácico.

Tal como se desarrollaron los acontecimientos fue Vesalio, y no Eustachio, quien puso su sello a la Anatomía. Hizo de Padua el centro de la disciplina, allí fue profesor desde 1537 hasta que se convirtió en médico del emperador Carlos V en 1544, y una gran

parte de la historia siguiente de la Anatomía hasta Harvey es la historia de los discípulos y sucesores de Vesalio. El primero de éstos fue su ayudante Realdo Colombo (hacia 1516-1559), que demostró experimentalmente la circulación pulmonar de la sangre (*vide supra*, página 202). Fue seguido por Gabriel Fallopio (1523-1562), que describió los ovarios y las trompas denominadas luego con su nombre, los canales semicirculares del oído y otras varias estructuras. Los propios discípulos de Fallopio ampliaron la tradición de Vesalio en Padua al estudio de la anatomía comparada, pero mientras tanto había comenzado a desarrollarse en otras partes un interés parecido.

Muchos de los que fueron atraídos por las ediciones impresas de Plinio o de las traducciones latinas de las obras zoológicas de Aristóteles pasaron de lexicógrafos humanistas a naturalistas. Un buen ejemplo de ello es Guillermo Turner (hacia 1508-1568), cuyo libro sobre las aves (1554), aun siendo en gran parte una compilación y aceptando leyendas como la de los escaramujos, contenía también muchas observaciones originales. La zoología del siglo XVI comenzó, pues, como una glosa de los clásicos y se realizó progresivamente a partir de la naturaleza. El sistema de clasificación reconocido por Alberto Magno en las obras de Aristóteles, que el sabio y médico de Oxford Edward Wotton intentó restaurar (1552), fue el cuadro de referencia del tema.

Los primeros animales, además de las aves, en atraer la atención fueron los peces. Durante la primera mitad del siglo XVI se escribieron exposiciones de varias faunas piscícolas, las del mar en

Roma y Marsella y la del río Mosela, pero el estudio científico de los animales marinos comenzó realmente con el *De Aquatilibus* (1553), del naturalista francés Pierre Belon (1517-1564). Belon era ya conocido por su relato de un viaje al Mediterráneo oriental, durante el que realizó algunas observaciones biológicas interesantes (1533). Adoptó una visión ecológica de este grupo; sus «aquatiles» eran los peces de los «cocineros y lexicógrafos», e incluía los cefalópodos y los cetáceos tanto como los *pisces*. Realizó la primera aportación moderna a la anatomía comparada. Hizo disecciones y comparó tres tipos de cetáceos, observó que respiraban por pulmones y comparó su esqueleto y corazón con los del hombre. Dibujó la marsopa unida por el cordón umbilical a la placenta, y al delfín, con su recién nacido todavía envuelto por las membranas fetales. También llevó a cabo un estudio comparado de la anatomía del pez, y en otro pequeño libro, *Histoire naturelle des oiseaux* (1555), en el que reconocía intuitivamente ciertos grupos naturales de aves, dibujó el esqueleto de un pájaro al lado de un hombre para mostrar las correspondencias morfológicas entre ellos (lámina 5). Otro francés, Guillermo Rondelet (1507-1566), que fue profesor de Anatomía en Montpellier y puede haber sido «nuestro honesto médico maestro Rondibilís» de Rabelais (que también estudió allí Medicina), incluía en su *Histoire naturelle des poissons* (1554-1555) una colección heterogénea similar de animales acuáticos. Era también una obra valiosa. En ella señalaba las diferencias anatómicas entre los sistemas respiratorio, nutritivo, vascular y genital de los vertebrados acuáticos que respiran por branquias y pulmones, y dibujó el delfín

vivíparo y el tiburón ovovivíparo. Intentó descubrir la correspondencia morfológica entre las partes de los corazones de los mamíferos y de los peces. Estudió la anatomía comparada de las branquias, que creía órganos refrigeradores, pero demostró también que un pez mantenido en una vasija sin acceso de aire podía asfixiarse. Creyó que la vejiga natatoria de los teleósteos, que él descubrió, era una especie de pulmón. La obra de Ippolito Salviani (1514-1572) es otra de las heterogéneas sobre animales acuáticos, publicada alrededor de la misma época (1554), que tiene interés por mostrar el influjo del arte contemporáneo en sus excelentes ilustraciones zoológicas.

Otro contemporáneo de estos autores fue el erudito y naturalista Conrad Gesner. Intentó elaborar, siguiendo la línea de Alberto Magno y de Vincent de Beauvais, a quien citaba, una enciclopedia que contuviera las observaciones de todos sus predecesores, desde Aristóteles a Belon y Rondelet. En el curso de esta tarea también hizo observaciones propias, y gracias a su vasta correspondencia, fue un estímulo para otros. En la parte zoológica de su obra *Historia Animalium* (1551-1558) parece haber estado tan incierto acerca de la clasificación que ordenó los animales por orden alfabético. En otras obras, que contenían extractos de la *Historia*, los dispuso según el sistema aristotélico, omitiendo sólo los insectos. El material de insectos, recopilado por Gesner, Wotton y Thomas Penny (hacia 1530-1588), fue publicado finalmente como el *Theatrum Insectorum* de Mouffet. Los «insectos» de Mouffet eran los de Aristóteles, e incluían miriápodos, arácnidos y varias clases de gusanos, lo mismo

que el moderno grupo de los insectos. Su libro contenía un cierto número de observaciones nuevas, la mayor parte de ellas obra de Penny. La obra de Gesner como enciclopedista y zoólogo fue continuada por Ulysses Aldrovandi (1522-1605), profesor de Historia Natural en Bolonia, que entre otras cosas escribió el primer libro sobre peces que no incluía otras formas acuáticas.

Gesner y Aldrovandi incluían en sus obras enciclopédicas catálogos de fósiles o «piedras con figuras», de los que se habían hecho varias colecciones en el siglo XVI, incluyendo una del Papa Sixto V en el Vaticano. Los fósiles incluidos en estas colecciones eran principalmente equinodermos, conchas de moluscos y esqueletos de peces, y se prestó considerable interés a su origen. De hecho, las opiniones sobre este tema permanecieron divididas hasta el siglo XVIII, y no fue fácil reconocer el origen orgánico de algunos fósiles. Quienes sostenían que los fósiles no tenían origen orgánico, los explicaban por teorías como el influjo astral o la generación por vapores subterráneos. Incluso entre quienes sostenían que los fósiles eran restos orgánicos, algunos creían que habían sido transportados a las montañas por el Diluvio. La teoría de que los organismos se habían fosilizado donde habían vivido antes y habían sido encontrados perduró en las obras de Alberto Magno. Girolamo Fracastoro (1483-1553) aceptó esta idea, y también lo hizo Agrícola, que sostenía que el proceso de mineralización y fosilización se debía a un *succus lapidescens*, que puede haber significado precipitación a partir de una disolución. Otro autor, el ceramista francés Bernardo Palissy, que había sabido de las ideas de Leonardo sobre

estas cuestiones a través de Cardano, fue más allá y llegó a cierta comprensión de la significación de las formas fósiles para la morfología comparada. Lamentó que Belon y Rondelet no hubieran descrito ni dibujado peces fósiles lo mismo que formas vivas; ello hubiera mostrado entonces qué clases de peces habían vivido en esas regiones cuando se congelaron las piedras en las que fueron hallados. El mismo hizo una colección de fósiles, reconoció la identidad de un cierto número de formas, como los erizos marinos y las ostras, con sus familiares vivientes, y distinguió incluso variedades marinas, lacustres y de río. Gesner, en contraste con estas ideas avanzadas, admitió que algunos fósiles eran animales petrificados, pero consideró otros como productos *sui generis* de la misma tierra. Intentó clasificarlos, tomando como criterios su forma, las cosas a las que se parecían, etc. Aldrovandi consideró los fósiles no como restos de formas vivientes, sino como animales incompletos en los que la generación espontánea había fracasado en la realización plena.

Otro aspecto de la Biología que recibió nueva atención durante el siglo XVI fue la Embriología, cuyo estudio fue restablecido por Aldrovandi, quien se inspiró en Aristóteles y Alberto Magno para seguir el desarrollo del pollo abriendo huevos en intervalos regulares. Inició en esto a su discípulo holandés Volcher Coiter, quien, antes de asentarse finalmente en Nüremberg, estudió con Fallopio, Eustachio y Rondelet. Fue, pues, un hijo intelectual de Vesalio y el primero en adoptar el método comparado. Descubrió en el pollo, sobre el cual sus observaciones seguían la línea aristotélica,

el blastodermo, pero dejó a Aldrovandi el explicar cómo los huevos pasaban del ovario al oviducto, y fracasó en reconocer que el ovario de las aves era homólogo con el «testis femenino» de los mamíferos. Realizó un estudio sistemático del crecimiento del esqueleto del feto humano y señaló que los huesos eran precedidos por los cartílagos. También hizo un estudio sistemático de la anatomía comparada de todos los tipos vertebrados, excepto los peces. Su acentuación de los puntos de diferencia, más que de las homologías, muestra que no entendió completamente la significación del método comparado, pero sus comparaciones, bellamente ilustradas por él mismo, ampliaron enormemente la preocupación por el tema. Alcanzó los mejores resultados en su estudio sobre los esqueletos, de los cuales comparó los de muchas especies diferentes, desde la rana al hombre. También realizó un estudio comparado de los corazones vivos. Intentó interpretar la estructura de los pulmones de los mamíferos en términos de los órganos más sencillos de ranas y lagartos y entendió la diferencia de sus mecanismos respiratorios. Realizó un cierto número de descubrimientos anatómicos, de entre los cuales los de las raíces nerviosas dorsales y ventrales fue quizá el más importante, e intentó clasificar los mamíferos sobre una base anatómica.

El método comparado fue extendido sistemáticamente a la Embriología por el sucesor de Fallopio en Padua, Girolamo Fabrici, que fue profesor allí en la misma época que Galileo, Fabrici hizo un cierto número de contribuciones a la Anatomía. Su teoría embriológica, como la de su discípulo Harvey, fue en principio

enteramente aristotélica. Pero defendía que la mayoría de los animales se engendraban de «huevos» y no espontáneamente, realizó buenos dibujos de las últimas etapas del desarrollo del pollo e hizo un cuidadoso estudio de la embriología de un gran número de vertebrados. En estos últimos prestó particular atención a las membranas fetales y confirmó la afirmación de Julio César Arantio (1564) de que, aunque los sistemas vasculares materno y fetal estaban en estrecho contacto con la placenta, no había paso libre entre ellos. Hizo una exposición clara de otras estructuras anatómicas conocidas asociadas con el sistema sanguíneo fetal, como el *ductus arteriosus* y el *foramen ovale* (descubierto por Botallus, 1564). Las válvulas de las venas habían sido observadas por un cierto número de anatomistas, pero fue Fabrici quien publicó el primer dibujo claro sobre ellas (1603), que utilizó luego Harvey para ilustrar su libro. Fabrici intentó en sus estudios comparados fijar los puntos comunes a los diferentes vertebrados y los que definían diferencias específicas. Sostenía que cada órgano de los sentidos tenía su propia función especial y no podía realizar otra, pero aunque dibujó el cristalino en su posición correcta en el ojo, todavía creía que era la sede de la visión. Trató de analizar la mecánica de la locomoción, y comparó las acciones del esqueleto interno de los vertebrados y el esqueleto externo de los artrópodos. Observó que el gusano se movía por la contracción alternada de sus músculos longitudinales y circulares, y examinó la relación del centro de gravedad con la postura en las aves. Sin embargo, hasta que Borelli (1680) pudo hacer uso de la mecánica de Galileo estos

problemas no recibieron una solución adecuada.

El método comparado de Fabrici fue desarrollado por su antiguo servidor y discípulo Giulio Casserio (1561-1616), que le sucedió en Padua. Casserio ha sido descrito como un gran artesano que emprendió la tarea de explicar la fábrica del hombre por referencia a la de los animales inferiores. Dividió su investigación, como había hecho Galeno, en estructura, acción y usos (función). Su método consistía en describir primero la condición humana en el feto y en el adulto y luego seguirla en una larga serie de otros animales. Ello aparece con toda claridad en su estudio de los órganos de la voz y el oído, durante el cual describió los órganos sonoros de la cigarra y los osículos de un gran número de vertebrados terrestres, y descubrió el oído interno del lucio (lámina 24).

El sucesor de Casserio, Adriaan van der Spieghel (1578-1625), cuya obra principal consistió en perfeccionar la terminología anatómica, fue el último de la gran estirpe de Padua, y tras él la anatomía animal se desarrolló en una dirección distinta. Su contemporáneo en Pavía, Gasparo Aselli (1581-1626), descubrió los vasos quilíferos mientras hacía la disección de un perro que había comido alimentos que contenían grasas. Son los vasos linfáticos que llevan a la corriente sanguínea, en la vena yugular, las sustancias grasas absorbidas por el intestino, pero que Aselli creyó que llevaban del intestino al hígado. Otro contemporáneo, Marco Aurelio Severino (1580-1656), discípulo en Nápoles del filósofo antiaristotélico Campanella, redactó un tratado sobre anatomía comparada titulado *Zootomia Democritaea* (1645), carente de respeto por las ideas de su

maestro. En él reconocía la unidad de los vertebrados incluido el hombre, pero consideró a éste como el «arquetipo» básico determinado por designio divino, y las divergencias de él como debidas a diferencias en la función. Descubrió el corazón de los crustáceos superiores, hizo la disección del de los cefalópodos, pero sin entenderlo; reconoció la función respiratoria de las agallas de los peces, inventó el método para estudiar los vasos sanguíneos inyectando un medio solidificador y recomendó el empleo del microscopio. Aunque escribió después de Harvey, tenía los mismos defectos que sus predecesores.

El esfuerzo de los anatomistas del siglo XVI consistió en explorar, describir y comparar la estructura del cuerpo humano y animal, para intentar hacer algunos ensayos de relacionar los resultados por medio de una clasificación biológica y entender la variedad de formas animales. Pusieron las bases de la obra que iba a llevar a la teoría de la evolución orgánica; pero sus concepciones fisiológicas no sólo eran vagas, inexactas e incoordinadas, sino que también sus inferencias no se elevaban más allá de una consideración crítica y total de los datos. Sus concepciones de la función biológica eran, en gran parte, heredadas del pasado y permanecían todavía sin relacionar con sus descubrimientos sobre la estructura. Ambas cosas iban a ser puestas en relación por otro hijo de Padua, Guillermo Harvey (*vide supra*, pp. 199 y ss.).

Harvey realizó un cierto número de progresos en Embriología. Aunque ha sido criticado por su trabajo en este campo, aplicó de hecho a este difícil tema los mismos principios que había utilizado

con éxito al analizar el problema más sencillo de la circulación de la sangre. Entre sus contribuciones a la embriología comparada se encuentra un cierto número de observaciones concretas sobre la placenta y otras estructuras, la identificación definitiva de la cicatrícula de la membrana de la yema del huevo como punto de origen del embrión del pollo y un estudio claro del crecimiento y la diferenciación. Otra contribución estaba sobrentendida, en una observación de sus *Exercitationes de Generatione Animalium* (1651), exerritatio 62: «El huevo es el comienzo común para todos los animales.» Alberto Magno, que había hecho una observación semejante (*vide* vol. I, p. 144), aceptó también la generación espontánea de los mismos huevos u *ova*; y puesto que Harvey no fue claro sobre ese punto, especialmente en el *De Motu Cordis*, existen diferentes opiniones acerca de si pensaba lo mismo. Algunos pasajes sugieren de una manera terminante que defendía que todas las plantas y animales se originaban de «semillas» que provenían de padres de la misma especie, aunque estas «semillas» podían a veces ser demasiado pequeñas para ser observables. Como declaraba en el *De Generatione Animalium*: «Muchos animales, especialmente los insectos, provienen y son propagados de elementos y semillas tan pequeños que son invisibles (como átomos volando por el aire), esparcidos y dispersados aquí y allá por el viento; y, sin embargo, se supone que estos animales han surgido espontáneamente, o de la descomposición, porque no se puede ver su *ova* en ninguna parte.» Francesco Redi, que fue el primero en refutar experimentalmente la generación espontánea de los insectos (1668), interpretó las ideas de

Harvey en este sentido. Así, aunque Harvey no entendió la naturaleza del *ovum*, que identificaba todavía en los insectos como la larva o la crisálida, y en los mamíferos con pequeños embriones rodeados por sus membranas o corión, sus ideas, que cristalizaron «n el *omne vivum ex ovo* que figuraba en el frontispicio de sus libros, estimuló la investigación de sus seguidores en este campo.

Las propias observaciones de Harvey le llevaron a rechazar las teorías aristotélica y galénica sobre la fecundación. Según Aristóteles, el útero de una hembra fecundada debería contener sangre y semen; según Galeno, una mezcla de semen masculino y femenino. En las ciervas del rey que disecó en Hampton Court no pudo encontrar prueba visible de la concepción después de algunos meses de apareamiento. No tuvo suerte porque los ciervos son especiales en este aspecto; pero tampoco pudo ver nada durante varios días en otros animales normales, como perros y conejos. Concluyó, por tanto, que el macho contribuía con un influjo inmaterial, como el de las estrellas o del imán, que hacía desarrollarse al huevo femenino. Aunque la producción de huevos en los folículos ováricos no fue descubierta hasta después de Harvey, puede considerársele, pues, como el iniciador de la teoría «ovista» del siglo XVII, según la cual la hembra aportaba todo el embrión. Después de que Leeuwenhoek descubriera con su microscopio el espermatozoide (1677), la escuela rival de los «animalculistas» pretendió lo mismo para el macho, y la controversia resultante prosiguió durante la mayor parte del siglo XVIII.

La otra gran controversia embriológica en la que los seguidores de

Harvey consumieron sus energías fue la de la epigénesis y la preformación. El propio Harvey reafirmó claramente la preferencia de Aristóteles por la primera, por lo menos en los animales sanguíneos; sostenía que el desarrollo era la producción de estructuras *de novo* a medida que el embrión se aproximaba a la forma final adulta. Los ovistas y animalculistas posteriores sostuvieron igualmente, más tarde, que el adulto se formaba por la «evolución», o desenrollamiento, de partes ya presentes por completo en el germen.

Esto estaba más de acuerdo con el mecanicismo de la época; y al año siguiente de la muerte de Harvey, Gassendi publicó la teoría del preformacionismo panespermático, basada en su teoría atomista. Pero tiempo antes, Descartes había elaborado una teoría biológica aún más mecanicista (*vide supra*, pp. 213 y ss.).

Los trabajos sobre la reproducción conducirían a la formulación de la teoría del germen de la enfermedad, aunque ésta no fuera bien entendida hasta la época de Pasteur, en el siglo XIX. A principios del siglo XVI, Fracastoro propuso una teoría según la cual las enfermedades estaban provocadas por la transferencia de *seminaria* o semillas. Es famoso por haber introducido el término sífilis y por haber descrito esta enfermedad, que había aparecido de forma virulenta en Nápoles en 1495, ocupada entonces por las tropas españolas, durante el sitio por el ejército de Carlos VIII de Francia. Presentó esta teoría de la enfermedad en su *De Contagione*, publicado en 1546, en el que repetía los datos, ya conocidos, de que la enfermedad podía ser transmitida por contacto directo, por el

vestido y los utensilios, y por infección a distancia, como la viruela o la peste (*vide* vol. I, pp. 209-210). Para explicar esa acción a distancia utilizó una modificación de la antigua teoría de la «multiplicación de las especies»; decía que durante la putrefacción asociada con la enfermedad salían pequeñas partículas de contagio por exhalación y evaporación, y que éstas «se propagaban de la misma forma» a través del aire, agua u otro medio. Cuando se introducían en otro cuerpo, se esparcían por él y provocaban la putrefacción de aquel de los cuatro elementos con el que tenían mayor analogía. Fracastoro atribuyó a esas *seminaria* la propagación de la tisis contagiosa, la rabia y la sífilis.

Parece que Fracastoro fue también el primero en reconocer el tifus; la práctica de registrar cuidadosamente los casos clínicos, que venía haciéndose en los *consilia* y en los tratados de peste desde el siglo XIII, culminó, en el siglo XVI, en un conjunto de buenas descripciones de enfermedades, por ejemplo, la clara descripción del sudor inglés, publicada por John Caius en 1552. Esta práctica se extendió en el siglo XVII y produjo descripciones clínicas tan excelentes como la de Francis Glisson del raquitismo infantil en 1650, la historia clínica del rey Jacobo I, de sir Theodore Turquet de Mayeme, y las cuidadosas descripciones de la viruela, gota, malaria, sífilis, histeria y otras enfermedades, dadas por Thomas Sydenham (1624-1689). Esta insistencia en la observación, y la suspicacia respecto de las teorías demasiado fáciles que había impedido acercarse a los hechos con actitud nueva, llevó a un gran aumento del saber empírico y de los métodos empíricos de tratamiento;

todavía hoy la Medicina, en el siglo XX, es en gran parte un arte empírico. Ya a principios del siglo XVI, si no antes, se utilizaba el mercurio para tratar la sífilis, y desde principios del XVII la corteza de quina, de la que se obtiene la quinina, se utilizaba para tratar la malaria. Fue introducida en Europa, desde Perú, por los misioneros jesuitas y se llamó por ello «corteza de los jesuitas». El adecuado conocimiento de las enfermedades infecciosas y de las causas de los trastornos funcionales y orgánicos del cuerpo tendría que esperar a la adquisición gradual del saber fundamental de la Biología y la Fisiología durante los siglos XVIII y XIX.

2.8. La filosofía de la ciencia y el concepto de naturaleza en la revolución científica

A mediados del siglo XVII, la ciencia europea había recorrido un largo trecho desde que Adelardo de Bath había exigido explicaciones en términos de causalidad natural y desde que los métodos experimental y matemático comenzaron a desarrollarse dentro del sistema de pensamiento científico predominantemente aristotélico de los siglos XIII y XIV. Hacia el siglo XVII se habían realizado ya progresos revolucionarios en la técnica experimental y matemática, que iban a proseguir con rapidez creciente durante ese siglo. Por tomar sólo una ciencia como ejemplo, la Astronomía en 1600 era copernicana, y aun no completamente; en 1700 era newtoniana, y estaba apoyada en la impresionante estructura de la mecánica newtoniana. Sin embargo, las afirmaciones sobre los propósitos y métodos expresadas por los portavoces de la nueva ciencia del siglo

XVII eran notablemente similares a las expresadas por sus predecesores de los siglos XIII y XIV, que fueron, de hecho, portavoces de la ciencia moderna en una etapa más temprana de su historia. Eran notablemente similares, pero no sin diferencias.

La idea utilitaria, por ejemplo, fue expresada por Francis Bacon con palabras muy parecidas a las de su homónimo del siglo XIII, incluso respecto al valor particular que daba al método inductivo. «Estoy trabajando para poner los cimientos —decía Bacon en el prefacio de la *Instauratio Magna*—, no de una escuela o doctrina particular, sino de la utilidad y potencia humanas.» El propósito de la *Instauratio Magna*, o nuevo método, era mostrar cómo reconquistar ese dominio que había sido perdido con el pecado original. En el pasado, la Ciencia había sido estática, mientras habían progresado las artes mecánicas, porque la observación fue despreciada en la Ciencia. Solamente gracias a la observación podía conseguirse el conocimiento de la naturaleza; y sólo éste conducía al poder; y el conocimiento que debía buscar el científico era el de la «forma», o esencia causal, cuya actividad producía los efectos observados. El conocimiento de la forma proporcionaba el dominio sobre ella y sus propiedades; y de ese modo la tarea positiva del nuevo método de Bacon consistía en mostrar cómo adquirir conocimiento de la forma. Como declaraba en el *Novum Organum* (1620, libro I, aforismo 3): «El saber humano y el poder humano son lo mismo; porque donde no se conoce la causa, no se puede producir el efecto. Para poder dar órdenes a la naturaleza se la debe obedecer; y lo que en la contemplación es como la causa, en la operación es la regla.» Lo que

entendía por la «forma» de un cuerpo o un fenómeno lo explicaba más adelante en el libro II, aforismo 2: «Porque aunque en la naturaleza no existe realmente nada más que los cuerpos individuales, que realizan acciones puramente individuales, según una ley fija; sin embargo, en la filosofía de esta auténtica ley, y en la investigación, descubrimiento y explicación de ella, es donde se encuentra el fundamento tanto del saber como de la operación. Y es esta ley, con sus cláusulas, lo que entiendo cuando hablo de formas; un nombre que adopto con agrado porque se utiliza y se ha hecho familiar.»

La conclusión, entre paréntesis, de esta cita es una advertencia de que Bacon podía estar ocultando, con su lenguaje engañosamente escolástico, conceptos muy alejados de la «forma sustancial» y de las cualidades reales en el sentido de las «naturalezas» escolásticas. También sirve como un recordatorio de que la historia del método científico debe incluir en el campo de sus estudios no sólo los procedimientos lógicos descritos o utilizados por los filósofos de la naturaleza, sino también —y sin ellos no entenderíamos nada— los problemas reales a los que se aplicaba los procedimientos y las hipótesis elaboradas respecto del tipo de explicación que ellas podían suministrar. Por ejemplo, es imposible ver el punto central de los estudios de Grosetesta u Ockham sobre el método científico sin el contexto de la filosofía de la naturaleza al que lo aplicaron. Galileo y Kepler dirigieron sus análisis del método científico hacia los problemas particulares cinemáticos y dinámicos que estaban intentando resolver; su punto central puede captarse sólo en

relación a ellos y a los tipos de leyes que esperaban descubrir. Los procedimientos de la Ciencia son métodos de responder preguntas sobre los fenómenos; las preguntas dan la definición a los fenómenos y los transforman en problemas. Mucho de lo que se pregunta sobre tales datos estará determinado simplemente por los procedimientos técnicos, matemáticos y experimentales de uso corriente o que se están desarrollando. Pero la forma que adoptan las preguntas, la dirección y la amplitud que se les da en la búsqueda de una explicación, estará inevitablemente muy influida por la filosofía del investigador o por su concepción de la naturaleza, por sus presupuestos metafísicos o «creencias reguladoras», porque son éstas las que determinarán su concepto del tema efectivo de su investigación, el de la dirección en la que se encontrarán las verdades ocultas detrás de las apariencias. Son éstas las que a menudo determinarán lo que un científico considera significativo en un problema; pueden inspirar su imaginación científica, como hicieron con Galileo y Kepler; y pueden poner límites a lo que considera como admisible en cuanto explicación, como la objeción a la acción a distancia hizo con las críticas de la teoría de la gravitación de Newton. Estos presupuestos filosóficos pueden, desde luego, ser modificados profundamente en el curso de una investigación científica. Pueden ser refutados por la observación, como Newton refutó la hipótesis de la circularidad de todos los movimientos celestes. O pueden ser por ellas mismas irrefutables empíricamente, como el concepto escolástico de «naturaleza» o la creencia de que todos los fenómenos pueden ser reducidos a

materia y movimiento. Esas concepciones son abandonadas o modificadas solamente al pensarlas de nuevo. Pero nunca ha existido ciencia natural enteramente desprovista de una concepción previa de objetivos teóricos de carácter filosófico.

En la historia real de la Ciencia, muchas de las teorías fecundas han sido desarrolladas a partir de ideas preconcebidas sobre el tipo de leyes o entidades teóricas que debían ser descubiertas para explicar los fenómenos. La historia de la investigación ha consistido, en una gran medida, en emplear los aguzados instrumentos de la matemática y el experimento para esculpir a partir de estas concepciones previas una teoría que se adecuara exactamente con los datos. Un buen ejemplo de esto es la teoría atomista, considerada, primero, como un material científico de este tipo en el siglo XVII y reducida, finalmente, a forma empírica exacta por John Dalton en 1808. Por lo que concierne al método científico, todo el período desde el siglo XIII al XVII puede considerarse como un período en el que las funciones de los principios experimentales de la verificación, refutación y correlación, y las técnicas matemáticas, fueron entendidos y aplicados con éxito creciente para reducir las filosofías de la naturaleza a ciencia exacta (cf. *supra*, pp. 20 y ss.). Por ejemplo, la filosofía neoplatónica de la naturaleza, con su concepción geométrica de la última «forma» de las cosas, se hizo científicamente significativa por primera vez con la filosofía de la luz de Grossetesta. Pero, a pesar de sus análisis de la lógica de la ciencia experimental, el mismo Grossetesta dejó las explicaciones, que derivó de su neoplatonismo, no sólo muy débilmente conectadas con los

datos, sino, a veces, en contradicción real con éstos. Son los investigadores matemáticos y experimentales de este período, más técnicos y menos filósofos, inspirados más por Euclides y Arquímedes que por Platón y Aristóteles, quienes fueron más exactos empíricamente en la práctica; y solamente cuando Galileo y Kepler aprovecharon enteramente los procedimientos técnicos, el neoplatonismo produjo ciencia exacta.

Es precisamente en un papel crítico de este tipo como Francis Bacon concebía su método inductivo para «el descubrimiento de formas». Por «forma», Bacon entiende algo completamente específico: la estructura geométrica y el movimiento. La idea habitual que se tiene de él como un puro empirista, comenzando sin ideas preconcebidas ni hipótesis, no se encuentra en absoluto confirmada por su obra principal sobre el método científico, el *Novum Organum*, aunque se aproxime más a esa idea en las interminables tablas de instancias que forman las «Historia Natural y Experimental» de la *Sylva Sylvarum*. Los logros de Bacon son los de un filósofo con una clara comprensión del principio empírico, pero casi con ninguna de los procedimientos técnicos necesarios, no sólo para resolver los problemas, sino incluso para formularlos de una manera científicamente significativa.

Bacon, en su *Novum Organum*, se proponía explícitamente, por supuesto, sustituir el *Organum* de Aristóteles; pero cuando se le compara con las distintas concepciones del método científico defendidas en la época antigua y en la de principios de la moderna, aparece claramente que el método de Bacon tiene mucho más en

común con el de Aristóteles que, por ejemplo, los métodos de postulados de Arquímedes y Galileo. Basó su método en el análisis de la materia más que en las idealizaciones de la Mecánica; estaba orientado a descubrir la composición de los cuerpos, y es significativo que un gran número de sus ejemplos estuvieran tomados de la Química. Si uno busca la raíz de su método, es fácil encontrarla en el método hipotético de Demócrito y en la dialéctica de Platón (cf. *supra*, páginas 18, 125-126). La idea corriente contra la que escribieron Bacon y otros defensores, contemporáneos suyos, de la «nueva filosofía» era que la explicación de los fenómenos podía presentarse en términos de formas sustanciales cualitativas y cualidades reales que constituían las «naturalezas» de los escolásticos. Los filósofos de la naturaleza de la época, viendo que aquéllas eran de poca ayuda, asimilaron su filosofía de la naturaleza a la nueva ciencia, desarrollando una concepción más matemática de la «forma» basada en el atomismo de Demócrito y Epicuro y de Herón de Alejandría (*vide* vol. I, p. 39, nota 4; *supra*, p. 41, nota 7), mientras que Galileo y Kepler llegaron a distinguir entre las cualidades geométricas, primarias y reales, que pertenecían a los cuerpos y las cualidades, secundarias, producidas por la acción de éstos sobre los órganos de los sentidos (*vide infra*, p. 267). Bacon fue uno de los primeros autores modernos en proponer la reducción completa de todos los fenómenos de la naturaleza a materia y movimiento. En sus *Cogitationes de Natura Rerum* escribió: «La doctrina de Demócrito respecto de los átomos es o verdadera, o útil para la demostración.» Su propuesta de «el descubrimiento de

formas» en el *Advancement of Learning (El progreso del saber)* (1605) era una investigación de la explicación de las propiedades de los cuerpos, pero afirmaba que ésta se había alejado demasiado del experimento. Su objetivo era fundamentar la investigación no en los átomos de los filósofos, sino en la inducción. Entonces, como decía en el *Novum Organum*, libro 2, aforismo 8, «seremos conducidos solamente a las partículas reales, tal como existen realmente». Estas constituían la «configuración latente» de la forma, oculta a la vista, pero susceptible de descubrimiento por el razonamiento inductivo. Su movimiento constituía el «proceso latente», y la variación del movimiento producía efectos manifiestos diferentes en la «naturaleza», por los que entendía cualquier tipo de acontecimiento observable, como el calor, la luz, el magnetismo, el movimiento planetario, la fermentación. De ese modo, su idea previa del tipo de entidades que su análisis inductivo proporcionaría era tan definida como la de los escolásticos que escribieron sobre el método científico y que estudiaron la «resolución» de los cuerpos en los cuatro elementos y causas aristotélicas, o una enfermedad en un conjunto de especies preconcebidas de un género (cf. *supra*, pp. 22, 32-35). Y Bacon describió la forma, tal como la concebía, en un lenguaje similar al utilizado por los escolásticos para las cuatro causas aristotélicas, como las condiciones necesarias y suficientes para producir el efecto observado. «Porque —decía en el libro 2, aforismo 4— la forma de una naturaleza es tal que, dada la forma, se sigue infaliblemente la naturaleza.» Esto le llevó a fundamentar la investigación de la forma en los métodos de acuerdo o presencia, de

diferencia o ausencia, y de variación concomitante (cf. *supra*, p. 126).

El método de Bacon seguía el patrón de los procesos deductivos e inductivos ya observados en sus predecesores medievales. Su principal contribución a la teoría de la inducción fue exponer muy claramente y con gran detalle tanto el método de alcanzar la definición de una «naturaleza común», o forma, recogiendo y comparando casos de sus supuestos efectos, como el método de eliminar las formas falsas (o lo que podría denominarse ahora hipótesis) por lo que llamaba «exclusión». Esto era análogo al método de «invalidación» de Grosetesta (*falsificatio*). Bacon decía en el *Novum Organum*, libro 1, aforismo 95:

Los que han manejado las ciencias han sido o empíricos o dogmáticos. Los empíricos son como las hormigas, sólo recogen y usan; los segundos parecen arañas, que hacen telarañas de su propia sustancia. Pero la abeja toma un camino intermedio, recoge su material de las flores de los jardines y de los campos, pero lo transforma y digiere por un poder propio. La verdadera tarea de la Filosofía no es distinta de ésta; pues no descansa única o principalmente sólo en los poderes de la mente, ni se limita a tomar la materia reuniéndola de la historia natural y de los experimentos mecánicos y dejándola enteramente en la memoria como la encontró, sino que la deja en el entendimiento una vez alterada y digerida. Por tanto, es posible esperar mucho de una unión más estrecha y más pura entre estas dos facultades, la experimental y la racional (tal como todavía nunca

ha existido)... Ahora bien [seguía en el libro 2], mis instrucciones para la interpretación de la naturaleza abrazan dos divisiones genéricas: una, de cómo educir y formar axiomas a partir de la experiencia; otra, de cómo deducir y derivar nuevos experimentos de los axiomas.

La primera etapa del descubrimiento de una forma era hacer una colección puramente empírica de casos del fenómeno o «naturaleza» que se iba a investigar. Como una muestra de su método y del tipo de cosas que deberían investigarse, dio su conocido ejemplo de la «forma del calor». Como decía en el *Novum Organum*, libro 2, aforismo 10; «Debemos preparar una *Historia Natural y Experimental*.» La etapa siguiente era realizada por lo que pretendía ser un nuevo tipo de inducción, usado hasta entonces solamente por Platón. El tipo corriente de inducción «por simple enumeración» se basaba generalmente, como decía en el libro 1, aforismo 105, en demasiados pocos casos y «expuesta al peligro de un caso contradictorio... Pero la inducción de la que se debe poder disponer para el descubrimiento y la demostración de las ciencias y las artes debe analizar la naturaleza por rechazos y exclusiones apropiados; y entonces, después de un número suficiente de casos negativos, llegar a la conclusión de los afirmativos». Para realizar esta inducción «verdadera y legítima», las observaciones deben clasificarse en tres «Tablas y clasificaciones de los casos». La primera era una tabla de «Esencia y presencia», o de acuerdo, que incluía todos los hechos en los que estaba presente la forma

buscada (*e. g.*, el calor); la segunda era una tabla de «Desviación o de Ausencia en la proximidad», que incluía todos los casos en los que no se observaban los efectos de la forma buscada; la tercera era una tabla de «Grados o de Comparación», que incluía ejemplos de variaciones en los efectos observados de la forma buscada en el mismo o en diferentes objetos. La inducción consistía, pues, simplemente, en la inspección de estas tablas. «El problema es — decía en el *Novum Organum*, libro 2, aforismos 15 y 16—

una revisión de los casos, de todos y cada uno, para hallar esa naturaleza tal como está siempre presente o ausente con la naturaleza en cuestión y que siempre aumenta y disminuye con ella... La primera tarea de la verdadera inducción (en cuanto concierne al descubrimiento de formas), por tanto, es el rechazo y exclusión de las diferentes naturalezas que no se encuentran en ese caso donde está ausente la naturaleza en cuestión, o se observan en algunos casos donde la naturaleza en cuestión está ausente, o se observa que aumentan en otros cuando la naturaleza en cuestión disminuye, o disminuyen cuando dicha naturaleza aumenta. Entonces, después de que se han realizado debidamente el rechazo y la exclusión, quedará en la base, disipándose en humo todas las opiniones frívolas, una forma afirmativa, sólida, verdadera y bien definida.»

El investigador, sobre la base de este residuo no eliminado, se embarcaba en lo que llamó en el aforismo 20 «un ensayo de la interpretación de la naturaleza en sentido afirmativo». La primera

etapa de este proceso conducía solamente a la primera «Vendimia» o a una hipótesis de trabajo. Así concluía: «De una revisión de los casos, de todos y cada uno, aparece que la naturaleza de aquello de lo que el calor es un caso particular es el movimiento... El calor mismo, su esencia y quiddidad, es movimiento y nada más.» De esta hipótesis se deducían nuevas consecuencias y se comprobaban con observaciones y experimentos ulteriores hasta que, finalmente, por observaciones repetidas y variadas seguidas por eliminación, se descubría la «verdadera definición» de la forma, y esto daba cierto conocimiento de la realidad subyacente a los efectos observados, conocimiento de la verdadera ley en todas sus cláusulas. «La forma de una cosa —decía en el *Novum Organum*, libro 2, aforismo 13— es la misma cosa auténtica, y la cosa difiere de la forma no demodo distinto a como lo aparente difiere de lo real, o lo externo de lo interno, o la cosa en relación al hombre de la misma en relación al universo.»

Para Bacon, la forma era siempre una cierta disposición mecánica; la inducción eliminaba lo sensible y cualitativo, dejando la fina estructura geométrica y el movimiento. La forma del calor era, pues, movimiento de partículas; la forma de los colores, una disposición geométrica de líneas. De hecho, en tiempos de Bacon, la propia palabra «naturaleza» había venido a significar propiedades mecánicas, la *natura naturata* del Renacimiento. Había desaparecido el principio animador espontáneo, *natura naturans*, de escritores como Leonardo da Vinci o Bernardino Telesio (1508-1588). El descubrimiento de la forma era el fin de los «experimentos

de la luz», que ocuparon las primeras etapas esenciales de la Ciencia; pero, como expone Bacon en la *Instauratio Magna*:

Estos dos objetos gemelos, el saber y el poder humanos, se encuentran realmente en uno; y es por ignorancia de la causa por lo que fracasa la operación.

El propósito final de la Ciencia era el dominio de la naturaleza. Además, decía en el *Novum Organum*; libro 1, aforismos 73 y 124:

Los frutos y las obras son como si fueran fiadores y seguridades para la verdad de las filosofías... La verdad y la utilidad son aquí la misma cosa: y las mismas obras son del mayor valor, tanto como prenda de la verdad como por su contribución a la comodidad de la vida.

Así, cuando Bacon excluía de la Ciencia las causas finales, no era porque no creyera en ellas, sino porque no podía imaginar una teleología aplicada de la misma forma que existía una física aplicada. Sostenía que la humanidad futura, siguiendo su «filosofía experimental», conseguiría un aumento enorme de poder y de progreso material. Como lo expresaba en el *Novum Organum*, libro 1, aforismo 109:

Hay, por tanto, gran fundamento para esperar que todavía hay muchos secretos en el seno de la naturaleza de uso excelente, que no tienen ninguna afinidad o paralelismo con nada de lo que es ahora conocido, sino que están enteramente fuera del alcance de la imaginación, que todavía no han sido

encontradas.

Y creía que la conquista final de la rama de la ciencia que describía en el *Advancement of Learning* como «Magia natural» sería la transmutación de los elementos. Fue por su utilitarismo y por su empirismo, más que por los cánones efectivos de su método inductivo, por lo que Bacon influyó principalmente en sus seguidores, si bien sus ideas sobre el método ejercieron cierta influencia en Inglaterra. Incluso Harvey declaraba en su *De Generatione, exercitatio 25*: «Con palabras del sabio Lord Verulam, para 'entrar en la segunda Vendimia'...» Su influjo más importante fue sobre la Royal Society. La descripción de Bacon del instituto de investigación, la Casa de Salomón, en su *The New Atlantis (La nueva Atlántida)*, publicada póstumamente en 1627, fue la inspiración auténtica de los distintos esquemas de instituciones científicas o colegios que encontraron su realización final en la fundación de la Royal Society. Por influjo de Bacon, los miembros se dedicaron desde el principio a investigaciones experimentales, e intentaron no sólo promover el «conocimiento de la naturaleza», sino también un saber que fuera útil para los oficios e industrias. En el *Advancement of Learning*, Bacon declaraba que el auténtico fin de la actividad científica era «la gloria del Creador y el alivio del estado del hombre». Haciéndose eco de esto, la segunda Carta de la Royal Society que recibió el Gran Sello el 22 de abril de 1663, y por la cual la Sociedad se gobierna todavía, exponía que sus miembros «se han de aplicar a promover por medio de la autoridad de los experimentos las ciencias

de las cosas naturales y de las artes útiles, para Gloria de Dios Creador, y el provecho de la raza humana». Los miembros fueron requeridos por el gobierno para investigar problemas como las técnicas utilizadas en la navegación y en la minería, y ellos mismos vieron en la tecnología un medio de mejorar la base empírica de la Ciencia (cf. *supra*, p. 115). Esta acentuación de la utilidad de la Ciencia, tanto como su empirismo, fue lo que convirtió a Bacon en el héroe de D'Alembert y los enciclopedistas franceses del siglo XVIII.

Thomas Sprat, en su *History of the Royal Society* (1667), expresó una opinión típica sobre Bacon al describir sus obras como la mejor «defensa de la Filosofía Experimental, y las direcciones más adecuadas necesarias para promoverla», diciendo al mismo tiempo que las historias naturales de Bacon no sólo eran, a veces, inexactas, sino que también parecían «más bien aceptarlo todo que escoger, y amontonar más que registrar». Un ejemplo típico es la investigación de la forma del calor, donde los ejemplos iban desde las plumas tibias hasta los rayos del sol, y desde la pimienta «caliente» a la «quemazón» de las manos por la nieve. El influjo de Bacon condujo a veces a un empirismo ciego, pero es más típico el que ejerció sobre un hombre como Robert Hooke, que fue uno de los que utilizaron de hecho los métodos de Bacon, exponiéndolos en su *General Scheme*, publicado en las *Posthumous Works* (1705); pero fue un experimentador, matemático y formulador de hipótesis demasiado bueno para verse restringido de algún modo por lo que Bacon había hecho.

El único científico de la época que se consideró a sí mismo como un baconiano completo fue Boyle, «designado por la naturaleza para continuar» la fama del gran Verulamio, como lo describía el *Spectator* en 1712. «Gracias a innumerables experimentos, llenó, en gran medida, los planes y los esbozos de la Ciencia, que su predecesor había bosquejado.» Boyle tuvo una gran influencia sobre Newton y el siglo XVIII al manejar el empirismo de Bacon, su poco gusto por los sistemas y su insistencia en la primacía de los experimentos sobre la teoría. Por ejemplo, el significativo «*Proemial Essay*», en sus *Physiological Essays* (1661), estaba orientado a reforzar el empirismo baconiano contra el racionalismo cartesiano y el desarrollo especulativo de los sistemas más allá de la evidencia experimental. Según escribió: «Desde hace tiempo me ha parecido uno de los impedimentos no menores del progreso real de la verdadera filosofía de la naturaleza, el que los hombres hayan estado tan dispuestos a formular sistemas sobre ella, y que se hayan creído obligados o a callarse por completo, o a no escribir menos de un tratado completo de Fisiología.» Pero la obra de Boyle y la fama que adquirió en su tiempo son reveladoras precisamente porque muestran la influencia de aquel aspecto de Bacon que tan frecuentemente se ha olvidado: su filosofía de la naturaleza. Boyle no fue en mayor medida que Bacon un experimentador completamente antiteórico; es más acertado considerarle, con su editor del siglo XVIII Peter Shaw, como un «restaurador de la filosofía mecanicista» en Inglaterra⁴⁷. Según escribió él mismo en la *Producibleness of Chymical Principies* (1679), publicada como

apéndice a la segunda edición del *Sceptical Chymist*: «Porque aunque en ocasiones he tenido la posibilidad de discurrir como un escéptico, sin embargo, estoy muy lejos de pertenecer a esa secta, que considero ha sido no menos perjudicial a la filosofía de la naturaleza que a la propia divinidad.»

De hecho, lejos de ser un empirista escéptico, Boyle se encontraba dispuesto a hacer uso de hipótesis como ayuda a la investigación. Argumentando en favor de la «doctrina corpuscular» en el prefacio de su *Mechanical Origin...of...Qualities* (1675), escribía: «Porque siendo la utilidad de una hipótesis el dar una explicación inteligible de las causas de los efectos, o fenómenos propuestos, sin contrariar las leyes de la naturaleza u otros fenómenos; cuanto más numerosas y más variadas son las partículas, de las cuales algunas son explicables por la hipótesis que se les atribuye, y algunas son concordables con ella, o, por lo menos, no son discordantes de ella, tanto más valiosa es la hipótesis, y tanto más susceptible de ser verdadera. Porque es mucho más difícil encontrar una hipótesis que no es verdadera que se adapte a muchos fenómenos, especialmente si son de varios tipos, que solamente a unos pocos.» Pero concluía: «No intento, por tanto, al proponer las teorías y conjeturas presentadas en los siguientes artículos, privarme de la libertad de alterarlas o de sustituirlas por otras en su lugar, en caso de que un progreso ulterior de la historia de las cualidades sugiera hipótesis mejores o explicaciones mejores.» En un opúsculo inacabado y no publicado, titulado *Requisites of a Good Hypothesis*, realizó una distinción ulterior entre una «buena hipótesis», que explicaba el

mayor número de hechos sin contradicción, y una «excelente hipótesis», que era la única explicación o, al menos, la única buena. Tal hipótesis debía no solamente hacer posible predicciones, sino predicciones que permitieran ponerla a prueba experimental. Vale la pena citar todo el fragmento:

Los requisitos de una buena hipótesis son:

- *Que sea inteligible.*
- *Que ni suponga ni asuma algo imposible, ininteligible o comprobadamente falso.*
- *Que sea consistente consigo misma.*
- *Que sea adecuada y suficiente para explicar los Phaenomena, especialmente el principal.*
- *Que sea, por lo menos, consistente con el resto de los Phaenomena a los que se refiere en particular y que no contradiga a otros Phaenomena conocidos de la naturaleza o a la verdad física manifiesta.*
- *Las cualidades y condiciones de una hipótesis excelente son:*
- *Que no sea Precaria, sino que tenga suficiente fundamento en la naturaleza de la misma cosa o, por lo menos, esté bien recomendada por algunas pruebas auxiliares.*
- *Que sea la más sencilla de todas las buenas que somos capaces de construir; por lo menos, que no contenga nada que sea superfluo o impertinente.*
- *Que sea la única hipótesis que puede explicar los Phaenomena o, por lo menos, que los explique bien.*

Que permita a un naturalista avezado predecir *Phaenomena* futuros por su concordancia o incongruencia con ella, y especialmente que los acontecimientos de tal experimento sean diseñados de modo apto para examinarla, como cosas que deben, o no deben, ser consecuentes con ella⁴⁸. El problema de Boyle era el mismo que el de Bacon y otros contemporáneos suyos enfrentados con la inutilidad científica de la doctrina aristotélica de las «naturalezas». Como escribió en el prefacio de su *Mechanical Origin...of...Qualities*: «Si, por un puro cambio de la disposición y estructura interna de un cuerpo, es abolida una cualidad permanente, que se dice que fluye de su forma sustancial, o principio interno, y, quizá, también inmediatamente es seguida por una nueva cualidad que se produzca mecánicamente; si, digo, esto sucede en un cuerpo inanimado, especialmente si es también similar en cuanto al sentido, ese fenómeno no favorecerá poco la hipótesis que enseña que estas cualidades dependen de una cierta contextura, y otras afecciones mecánicas de las pequeñas partes del cuerpo, que están dotadas de ellas, y consiguientemente pueden ser abolidas cuando esta modificación necesaria es destruida.» La diversa y prolija colección de ensayos que forman el resultado de sus cuarenta años de dedicación a la filosofía de la naturaleza tenían una sola meta: descubrir por el experimento una explicación de las propiedades de los cuerpos, desarrollar una teoría universal de la materia sobre los mismos principios inteligibles, como la nueva ciencia de la mecánica. Boyle entendía por su análisis del «origen de las formas y cualidades» precisamente lo mismo que Bacon por su

«descubrimiento de las formas». El objeto de su «filosofía corpuscular», ni atomista ni cartesiana, sino desarrollada según las líneas sugeridas por Bacon, era explicar todas las propiedades manifiestas de los cuerpos por dos principios, el de la materia y el del movimiento, por el tamaño, la forma y el movimiento de las partículas, según las indicaciones suministradas por experimentos amplios. Esta forma de filosofía mecanicista fue reforzada por la producción experimental que hizo Boyle del vacío y sus experimentos sobre el aire. El aspecto fuertemente empírico de su pensamiento se muestra, por ejemplo, en su negativa a decidirse respecto de la causa de la elasticidad del aire, de la que establecía las características cuantitativas en la «ley de Boyle». Hay un paralelo de esto en la actitud adoptada por Edme Mariotte, que también formuló esa ley, y por Pascal. Boyle no dejó nunca de verificar e ilustrar cuidadosamente, mediante experimentos, las muchas hipótesis particulares que elaboró a lo largo de sus investigaciones. Pero la forma de estas hipótesis particulares y el tipo de entidades teóricas que incluían estaba determinado por una filosofía de la naturaleza que no se había sometido a verificación, sino que era una «creencia reguladora» *supuesta* en todo su pensamiento científico. Era la creencia en el mecanicismo universal que fue sostenida por Bacon no menos que por Descartes y que iba pronto a llegar a ser fructífera predictivamente en el mundo-máquina de Newton. Como escribía Boyle en sus *Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis* (1674): «Por el mismo hecho de que los principios mecánicos son tan universales y, por tanto, aplicables a

tantas cosas, son más adecuados para incluir, que obligados a excluir cualquier otra hipótesis que se encuentre en la naturaleza en la medida que así sea.»

El deseo de un conocimiento cierto de la naturaleza, que inspiró la obra de Bacon sobre el método, y que de hecho había inspirado desde San Agustín, o mejor desde Platón, toda la tradición racionalista del pensamiento europeo, con su creencia de que lo que es cierto es verdad en realidad, era el principal motivo subyacente a toda la ciencia del siglo XVII; fue lo que hizo a este siglo tan consciente del método. Hasta el final del siglo XVII, cuando comenzó a ser criticada esta forma aristotélica de predicación de atributos como inherentes en las sustancias permanentes reales por el nuevo empirismo de John Locke (1632-1704), todos los científicos se inspiraron por la fe de que estaban descubriendo, a través y detrás de los fenómenos concretos observados, la estructura inteligible del mundo real. Y de ese modo era enormemente importante poseer un método que pudiera facilitar este descubrimiento de la naturaleza real subyacente a las apariencias y garantizar la certeza de los resultados. El mismo énfasis en el método se observa en toda la Ciencia, sea en los numerosos «métodos» propuestos por los botánicos que buscaban un sistema «natural» en cuanto opuesto a uno meramente artificial de clasificación, sea en el método experimental y en el método matemático de los químicos y físicos.

A mediados del siglo XVII, a excepción de algunos biólogos para quienes los organismos representaban todavía un problema, casi todos los filósofos de la naturaleza, que se proponían descubrir este

mundo físico real, aceptaban que lo que pudieran descubrir tendría en cierto modo forma matemática. Fue Galileo quien expuso los desiderata metodológicos de esta filosofía mecanicista por su tratamiento explícitamente cinemático del movimiento y su firme rechazo de cualquier consideración de las «naturalezas y causas» aristotélicas, por ejemplo, en *Dos nuevas ciencias* (*vide supra*, páginas 135-137, 81 y ss.). Describió el concepto de naturaleza que su método perseguía muy claramente en 1632, en *II Saggiatore*, en su cuestión 6 (*vide supra*, p. 130) y en su famosa distinción entre las cualidades primarias y secundarias en la cuestión 48. Escribía, estudiando la observación de Aristóteles en el *De Caelo* (libro 2, capítulo 7) de que «el movimiento es la causa del calor»:

Pero primero quiero proponer algún examen de lo que llamo calor, cuya noción corriente, aceptada generalmente, está muy lejos de la verdad si mis dudas serias son correctas, en cuanto se supone que es un verdadero accidente, afección, y una cualidad que reside realmente en la cosa que percibimos que está caliente. Tan pronto como formo un concepto de un trozo de materia o de una sustancia corpórea, siento la necesidad de concebir que ella tiene límites que dan esta o aquella forma; que comparada con otra es grande o pequeña; que está en este o aquel lugar, en este o aquel tiempo; que se mueve o está en reposo, que toca o no toca a otro cuerpo; que es única, poca o muchas; ni puedo, por ningún esfuerzo de imaginación, disociarla de esas cualidades (condizioni). Pero no siento ninguna necesidad de aprehenderla como acompañada

necesariamente por esas condiciones de ser blanca o roja, amarga o dulce, sonora o silenciosa, de buen o mal olor. Por el contrario, si los sentidos no percibieran estas cualidades, quizá la razón y la imaginación solas nunca hubieran llegado a ellas. Por tanto, definiendo que estos gustos, olores, colores, etc., por parte del objeto en el que parecen residir, no son nada más que puros nombres y existen solamente en el cuerpo sensitivo; de modo que si el ser animado (animale) fuera suprimido, estas mismas cualidades se desvanecerían. Pero, sin embargo, habiéndoles dado nombres especiales diferentes de los de las otras cualidades primarias y reales (accidenti), nos persuadiremos a nosotros mismos que también existen tan verdaderas y realmente como las últimas. Puedo explicar mi concepción más claramente con un ejemplo. Paso mi mano primero por una estatua de mármol, después por un hombre vivo. Por lo que concierne al propio movimiento de la mano, es el mismo respecto de los dos cuerpos —esto es, las cualidades primarias, movimiento y tacto, porque llamamos a ellas no por otros nombres. Pero el cuerpo animado que padece esas operaciones tiene sensaciones (affezioni) diferentes según las partes tocadas. Por ejemplo, cuando se le toca en las plantas de los pies, en las rodillas o en las axilas, siente, además de la sensación común de ser tocado, otra a la que hemos dado el nombre particular de cosquilleo. Este sentimiento es enteramente nuestro, y no pertenece a la mano en absoluto; y me parece que sería un grave error decir que, además del

movimiento y el tacto, la mano tiene en ella misma otra facultad diferente de éstas, a saber, la facultad de cosquilleo, de modo que el cosquilleo sea una cualidad que resida en la mano. Un pequeño trozo de papel, o una pluma, llevado ligeramente sobre cualquier parte de nuestro cuerpo que desees realiza, por ella misma, idéntica acción en cualquier parte, es decir, mueve y toca; pero en nosotros, el tocar entre los ojos, o en la nariz, o en los orificios de la nariz, excita un cosquilleo casi insoportable, aunque en otras partes apenas podamos sentirlo. Ahora bien, este cosquilleo está todo en nosotros, y no en la pluma; y si se eliminara al cuerpo sensitivo, no sería más que un mero nombre (un puro nome). Creo que muchas cualidades (qualité) que son atribuidas a los cuerpos naturales, como los gustos, olores, colores y otras, tienen una existencia similar, pero no mayor.

Seguía relacionando cada uno de los cuatro sentidos con los cuatro elementos tradicionales, según una teoría corpuscular de la materia. El tacto correspondía a la tierra; el gusto, al agua; el olor, al fuego; el oído, al aire. El quinto sentido, la visión, correspondía a la luz, al éter. De ese modo, la tierra estaba siendo continuamente analizada en «partículas mínimas» (*particelle minime*) de diferentes clases. Algunas de éstas, habiéndose «alojado en la superficie superior de la lengua, y penetrado sus tejidos después de haber sido disueltas en su humedad, producían gustos que son agradables o desagradables según la diversidad del contacto proporcionado por las diferentes formas de estas partículas, y según que sean pocas o

muchas, o se muevan más o menos». Era semejante para el olfato y el oído. «Pero —concluía— sostengo que no existe nada en los cuerpos externos para excitar en nosotros gustos, olores y sonidos, excepto formas, tamaños, números y movimientos rápidos o suaves; y concluyo que si las orejas, lengua y nariz se quitaran, permanecería la forma, el número y el movimiento, pero no habría olores, gustos o sonidos que, separados de los seres vivos, creo que no son más que nombres, exactamente como el cosquilleo no es nada más sino un nombre si se suprimen la axila y la piel del interior de la nariz.» Respecto de la relación de la visión a la luz, concluía: «De esta sensación y de las cosas relacionadas con ella no pretendo entender más que muy poco, y ya que no dispongo mucho tiempo para explicar, o mejor esbozar, me callaré.»

Galileo esbozó en este famoso pasaje una auténtica filosofía mecanicista de la naturaleza. Combinando la distinción de Demócrito entre el mundo perceptivo de la apariencia sensible (que Aristóteles creía que era real) y el mundo conceptual real de las cualidades primarias con una concepción corpuscular de la materia derivada de Herón de Alejandría (*vide* vol. I, p. 39, nota 4; *supra*, p. 41, nota 7), ofreció una explicación de las propiedades físicas manifiestas de los cuerpos en términos de las características de sus partículas constituyentes. Además, concebía a éstas dinámicamente, tomando en cuenta las variaciones de sus movimientos, y pareciendo considerar la extensión a las partículas de leyes matemáticas semejantes a las que se habían manifestado tan provechosas al tratar con los movimientos de los cuerpos

macroscópicos.

La última meta científica de Galileo de descubrir la estructura real del mundo físico, de leer el libro real de la naturaleza en lenguaje matemático, se muestra claramente no sólo en sus controversias sobre la teoría copernicana, sino en todo lo que escribió sobre la filosofía de la Ciencia (*vide supra*, pp. 125 y ss, 181 y ss.). Ciertamente, ésta apuntaba a establecer una conexión cuantitativa y experimentalmente verificada entre las entidades reales, pero no observables, definidas por las cualidades primarias y las propiedades observadas de las que estas entidades eran la causa. El mismo Galileo proporcionó, con su método «resolutivo-compositivo», el medio eficaz de explorar y establecer esa conexión. Pero las tácticas que ejemplifica su enfoque cinemático del movimiento, su método de fraccionar un problema en cuestiones independientes y de proceder paso a paso, indican que Galileo no desarrolló de hecho nunca su filosofía mecanicista en una explicación científica, una teoría relacionada deductivamente con la predicción de los datos. De hecho, en el estado en que se encontraba el saber científico, hubiera sido una burda especulación el intentar ese desarrollo sistemáticamente. Galileo prefirió conservarlo como la última meta de su progreso empírico.

Fue Descartes el primero no sólo en proclamar que la filosofía mecanicista era la explicación universal de todos los fenómenos físicos, sino también en intentar realizar las explicaciones en detalle. Careciendo de la finura científica de Galileo y de sensibilidad por el hecho empírico, Descartes criticó el tratamiento

que Galileo había realizado del movimiento al dar descripciones matemáticas sin base filosófica y, por tanto, sin explicación (*vide supra*, p. 148). El ingenuo racionalismo de Descartes, su clara concepción de una filosofía de la naturaleza universal como meta de la Ciencia, le llevó a regiones de especulación ante las cuales dudaban científicos mucho mejores. Fue, sin embargo, precisamente esta ingenuidad especulativa la fuente de su única contribución importante al movimiento científico. Su concepción puramente unificadora del universo como un todo integrado, explicable por los principios mecánicos universales aplicables igualmente a los organismos y a la materia inerte, a las partículas microscópicas y a los cuerpos celestes, fue la que proporcionó un programa a las sucesivas generaciones de filósofos de la naturaleza —astrónomos, físicos, químicos y fisiólogos. Les dio una hipótesis, un modelo cuyas propiedades podían explotar. El cartesianismo, al convertirse en la filosofía predominante de la naturaleza a mediados del siglo XVII, sacó también a la luz los problemas filosóficos inherentes a la filosofía mecanicista, considerada como la verdad total y nada más que la verdad. Aun cuando la epistemología de Descartes y su metafísica fueran rechazadas, su física tuvo un influjo dominante, tanto en la Royal Society como en la Académie des Sciences. Cualquier sistema nuevo tenía que abrirse paso contra ella, e incluso la alternativa más famosa, el sistema newtoniano, cuya resistencia cartesiana en Francia fue solamente vencida por Maupertuis (1698-1759) y por Voltaire (1694-1778), se basaba en el mismo programa general de descubrir las leyes

unificadoras de la Cosmología. Triunfó al establecer el objetivo cartesiano con una precisión empírica enormemente superior. Aun cuando se demostraba erróneo en los detalles, el programa general del mecanicismo cartesiano continuó siendo una guía de la investigación, y sus conceptos generales se mostraron admirable y fructíferamente también adaptables a las exigencias de los resultados experimentales, como, por ejemplo, en la Fisiología, en las teorías de la luz de Hooke y Huygens y en la ulterior historia de la *matière subtile* o éter de Descartes que llenaba el espacio (cf. *supra*, página 148).

La base de la filosofía de la naturaleza de Descartes era su división de la realidad creada (*i. e.*, en cuanto distinta de Dios) en dos esencias mutuamente excluyentes y exhaustivas conjuntamente o «naturalezas simples», la extensión y el pensamiento, y su concepción del método que estaba orientado para darle cierto conocimiento de esta realidad. Es significativo que Descartes se parezca a un filósofo medieval, como Grossetesta o Roger Bacon, al presentar sus primeros resultados científicos publicados como ejemplos de la aplicación de una concepción del método científico. El volumen de tratados que marca una época, publicado en 1637, tenía por título completo *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les Sciences. Plus la dioptrique, les météores et la géométrie qui sont des essais de cette méthode*. El hecho de que dos de estas obras hubieran tratado de la Óptica y el que su primer ensayo cosmológico hubiera tenido por subtítulo *Traité de la lumière* es también un indicio de, por lo menos, parte de

la herencia intelectual de Descartes. Pero ya había escrito, antes de todas estas obras, entre 1619 y 1628, su tratado completo sobre el método, sus *Regulae and Directionem Ingenii*, publicadas póstumamente en 1701. Ese orden en la composición no puede mostrar con más claridad su acercamiento confiadamente racionalista a la Ciencia.

«Por método —escribía Descartes en la regla 4 de las *Regulae*— entiendo un conjunto de reglas ciertas y fáciles, tal que cualquiera que las obedezca exactamente, en primer lugar, nunca tomará nada falso por verdadero y, en segundo lugar, progresará por un esfuerzo ordenado, paso a paso, sin desperdicio de esfuerzo mental, hasta que haya conseguido el conocimiento de todo lo que no sobrepasa su capacidad de comprensión.» Seguía en la regla 5: «Todo el método consiste en el orden y disposición de los objetos a los que debe dirigirse la atención de la mente, para que podamos descubrir alguna verdad. Y observaremos estrictamente este método si reducimos, paso a paso, las proposiciones complicadas y oscuras a proposiciones más sencillas, y luego, partiendo de la intuición más simple de todas, si intentamos remontar por los mismos pasos hasta el conocimiento de todas las otras.»

Se debe hacer una distinción entre el método de Descartes en cuanto aplicado a la Filosofía y en cuanto aplicado a la Ciencia. Por lo que concierne a la Filosofía, las reglas que dio para analizar los datos de la experiencia eran para preparar la mente para un acto intuitivo, similar al descrito por Aristóteles al final de los *Analíticos posteriores*, por el que se captaba las «naturalezas simples». Estas

eran, por ejemplo, el pensamiento, la extensión, el número, el movimiento, la existencia, la duración —«ideas claras y simples», autoevidentes, que no podían ser reducidas a algo más simple y que no tenían, pues, definición lógica. El propósito de estas reglas era elegir y disponer los datos para este acto de intuición, e incluían una forma de inducción que implicaba el principio de eliminación. La meta filosófica de Descartes era reducir las «proposiciones complicadas y oscuras», con las que había comenzado desde la experiencia, a proposiciones que fueran o autoevidentes, o que se siguieran de proposiciones autoevidentes. Una vez hecho esto, sería capaz de explicar entonces todos los datos de la experiencia, mostrando que podían ser deducidos de las «naturalezas simples» descubiertas. Defendió que había tenido éxito en su búsqueda de las «naturalezas simples» que constituían el mundo creado. La última sustancia de todo era o *res extensa*, o *res cogitans*. Como escribía en los *Principia Philosophiae*, parte 1, sección 53:

Aunque cualquier atributo es suficiente para damos conocimiento de la sustancia, hay siempre una propiedad principal de la sustancia que constituye su naturaleza y esencia y de la cual todas las otras dependen. Así, la extensión en longitud, anchura y profundidad constituye la naturaleza de las sustancias corpóreas; y el pensamiento constituye la naturaleza de la sustancia pensante. Porque todo lo que, además de eso, se puede atribuir al cuerpo presupone la extensión, y no es más que una dependencia de lo que es extenso; de la misma forma que todas las propiedades que vemos en la cosa pensante no

son más que maneras diferentes de pensar. Así, por ejemplo, no podemos concebir la forma si no es en una cosa extensa, ni el movimiento más que en un espado extenso; del mismo modo, la imaginación, el sentimiento y la voluntad existen sólo en una cosa pensante y no podemos concebirlas sin ella. Pero, al contrario, podemos concebir la extensión sin figura ni movimiento, y la cosa pensante sin imaginación ni sentimiento, y lo mismo del resto de los atributos.

En la parte 2, sección 4, afirmaba la identidad de la materia y la extensión de modo aún más enfático, al escribir: «La naturaleza de la materia o del cuerpo en general no consiste en eso que es una cosa dura, o pesada, o coloreada, o que afecta a nuestros sentidos de cualquier otro modo, sino solamente en que es una sustancia extensa en longitud, anchura y profundidad... Su naturaleza consiste sólo en eso, en que es una sustancia que tiene extensión.» Las cualidades secundarias eran, pues, subjetivas; sólo la extensión y el movimiento tenían una existencia objetiva; y todas las propiedades que observábamos en la materia se debían a la diversificación de la materia original, por influjo del movimiento, en partículas de diferentes tamaños, formas y movimientos y a su subsiguiente agregación en cuerpos de varias clases. Descartes estaba tan ansioso de hacer desaparecer las formas sustanciales y todas las cualidades innatas reales —«propiedades ocultas»— que incluso excluyó la idea de que los cuerpos estuvieran dotados naturalmente de peso. Fue por suponer que la gravedad era una

cualidad innata y por no intentar explicársela por lo que Descartes criticó a Galileo y a Mersenne (cf. *supra*, p. 148). Su propio intento de explicar la gravedad residía en la *matière subtile* o éter que actuaba mecánicamente en este *plenum* de materia identificada con la extensión. En este *plenum*, toda acción se realizaba por contacto; excluía la posibilidad de un vacío, y era la base de su teoría de los torbellinos; y le permitía excluir la «fuerza oculta» de la atracción a distancia.

Cuando Descartes estudió por primera vez la aplicación de su método a la ciencia de la naturaleza, estaba tan confiado del éxito como lo estaba en Filosofía. La «Matemática Universal» esbozada en las *Regulae* debía repetir la estructura de su sistema filosófico dependiente de las «naturalezas simples». Iba a abarcar todo el mundo físico y a subordinar a ella todas las ciencias particulares; y dentro de este esquema, la Ciencia descubriría la causa invariable, la conexión inmutable entre el *datum* de la experiencia y el *quaesitum* de la teoría. Habría una completa unión entre la predicción y la explicación, si sólo ella pudiera probarse.

La exposición de Descartes del método científico en las *Regulae* era una variante del doble procedimiento familiar del análisis y la síntesis, o de la resolución y la composición. El objetivo de la investigación científica era reducir los problemas complejos tal como se presentaban en la experiencia, que él describía en un lenguaje hasta cierto punto aristotélico como *compuestos a parte rei*, a problemas específicos constitutivos para darles una solución cuantitativa, de modo que la situación compleja pudiera ser

reconstituida teóricamente y explicada por deducción a partir de los elementos descubiertos y de las leyes que los producían. La primera etapa del análisis llevaba una clasificación de los datos, y entonces el investigador, sobre esta base, elaboraba «conjeturas» hipotéticas de la causa. Las conjeturas eran necesarias porque la complejidad de la naturaleza exigía un camino indirecto hacia la verdad, y la etapa siguiente consistía en deducir las consecuencias empíricas que se seguían de ellas y eliminar las falsas conjeturas aplicando el método baconiano del *experimentum* o *instantia crucis*, utilizando el método del acuerdo, de la diferencia y variaciones concomitantes. Los «componentes» de la teoría mostraban la verdadera causa cuando correspondían perfectamente a los «componentes» de las cosas. Así, pues, la teoría explicaba los hechos, y los hechos probaban la teoría (cf. *supra*, páginas 33, 188; *infra*, p. 287). Descartes describió este movimiento recíproco como una «demostración», escribiendo en el *Discours*, parte 6:

Si algunas de aquellas [cosas] de las que he hablado en el principio de la Dióptrica y de los Meteoros pueden parecer chocantes a primera vista, porque las he denominado hipótesis y porque parezca que no tengo ganas de demostrarlas, que se tenga la paciencia de leer todo con atención y espero que se encontrará satisfacción. Porque me parece que las razones se siguen unas a otras de tal manera que, como las últimas son probadas por las primeras, que son sus causas, estas primeras son probadas, recíprocamente, por las últimas, que son sus efectos. Y no se debe pensar que cometo aquí el error que los

lógicos llaman un círculo; porque habiendo la experiencia muy ciertos la mayor parte de estos efectos, las causas de las que los deduzco no sirven tanto para establecer su existencia como para explicarlos; sino que, al contrario, son ellas las demostradas por ellos.

Siendo Descartes un «platónico agustiniano» del mismo tipo que Grosetesta y Roger Bacon, igual que ellos encontraron certeza solamente en la iluminación divina, así él la encontró únicamente en la creencia de que el más perfecto de todos los seres no le engañaría. Respaldado por esa garantía, afirmaba, en una carta a Mersenne escrita el 27 de mayo de 1638: «Hay solamente dos maneras de refutar lo que he escrito: una es probar por algún experimento o razonamiento que las cosas que he supuesto son falsas; y la otra, que lo que deduzco de ellas no puede ser deducido.» Desafortunadamente, como le gustaba a Newton mostrar, Descartes se exponía demasiadas veces a una refutación precisamente basada en esos fundamentos (cf. *supra*, pp. 148 y ss.).

Todo el proceso de investigación de Descartes por medio de las conjeturas presuponía la filosofía mecanicista como la base de la explicación, en cuanto distinta de la mera predicción o resumen de los hechos. Para Descartes, esa explicación debía ser siempre el último fin de la investigación científica, porque era la que conectaba los fenómenos concretos de la experiencia con las «naturalezas simples» que constituían, en último término, el mundo y proporcionaban así la última explicación de todos los fenómenos. De

ese modo, poniendo la ciencia de la naturaleza dentro de esta estructura filosófica, Descartes hizo necesario hasta cierto punto el responder a la pregunta final antes de responder a la primera.

El mismo punto de vista aparece en su actitud respecto de Harvey. En su descripción, en el *Tratté de L'homme*, de cómo el cuerpo funciona según las leyes puramente mecánicas, Descartes aplaudía el descubrimiento de Harvey de la circulación de la sangre, pero rechazaba el aceptar su exposición sobre la sístole y diástole del corazón, basándose en que, aun si los hechos de Harvey se manifestaban correctos, no había explicado la *razón* de la contracción del corazón. La propia explicación de Descartes del latido del corazón rechaza a la vez la de Harvey y la de Galeno, y significó un renacimiento de la concepción aristotélica del corazón como centro del calor vital que provocaba la expulsión de la sangre del corazón al hacerla hervir y dilatarse (*vide supra*, pp. 213 y ss.). Más tarde, en su *Description du corps humain* (1648; publicada en 1664), Descartes admitió que *une expérience fort apparente*, como la sugerida por la vivisección de un corazón de conejo, podría confirmar la exposición de Harvey sobre el movimiento del corazón, pero añadía: «Sin embargo, eso solamente muestra que las observaciones pueden a menudo llevarnos a engaño, cuando no examinamos suficientemente todas las causas que pudieran tener.» Podía demostrarse que la teoría de Harvey estaba de acuerdo con muchos fenómenos, pero «eso no excluía la posibilidad de que todos los mismos efectos se siguieran de otra causa, a saber, de la dilatación de la sangre que yo he descrito». Pero para poder ser

capaz de decidir cuál de estas dos causas es verdadera, debemos considerar otras observaciones que no concuerdan con ninguna de ellas. La elección entre las hipótesis rivales debía realizarse por medio de un *experimentum crucis* que refutaría una de ellas.

El último objetivo del método de Descartes tanto en Ciencia como en Filosofía consistía, pues, en último análisis, hacer patente, por medio de «largas cadenas de deducciones», la conexión entre la última realidad ontológica, en cuanto descubierta en las «naturalezas simples», y los muchos casos concretos de la experiencia. En esta concepción de una meta últimamente ontológica del descubrimiento científico, Descartes estaba de hecho de acuerdo con físicos matemáticos platonizantes, como Galileo y Kepler, que habían introducido esas convicciones empíricas en la identificación de las sustancias del mundo real con las entidades matemáticas contenidas en la teoría utilizada para predecir las «apariencias». Descartes se distinguió de esos contemporáneos suyos más empíricos no por su meta últimamente ontológica, sino por el menor grado de precaución empírica con que se movía hacia ella.

Fue en la forma extrema y sistemática dada a ella por Descartes, al ofrecer una amplia alternativa metafísica y cosmológica de la filosofía aristotélica, como la filosofía mecanicista suscitó los problemas filosóficos que vinieron a dar forma al carácter no sólo de la epistemología y de la metafísica del período, sino también a la filosofía de la Ciencia. Por ejemplo, la doctrina de la subjetividad de las cualidades «secundarias» fue tomada por Locke e incorporada a

su nueva teoría del conocimiento, según la cual el objeto propio de nuestro conocimiento no eran las cosas del mundo externo, sino los datos de la experiencia recibidos a través de los órganos de los sentidos y organizados por la mente. No es éste el lugar de estudiar la epistemología de Locke, pero es interesante el que tuviera que ser el mismo «restaurador» de la filosofía mecanicista, Robert Boyle, quien señalara que las cualidades primarias o conceptos geométricos —en cuyos términos la física matemática organizaba e interpretaba la experiencia— no fueran menos mentales que las cualidades secundarias, y que si cada grupo poseía una pretensión de realidad, entonces ambos tenían igual pretensión. George Berkeley (1685-1753) iba a hacer una crítica similar.

La identificación absoluta por Descartes de la materia con la extensión, orientada a la exclusión sin contemplaciones de cualquier propiedad innata de los cuerpos, iba a suscitar toda una gama de problemas. En la Física, las dificultades que esto significaba para explicar la gravitación y para determinar lo que se conservaba en la perduración del movimiento se convirtieron en los principales temas de las controversias entre Huygens, Leibniz y los newtonianos. Estos son buenos ejemplos del origen metafísico de muchos conceptos científicos que fueron únicamente más tarde recortados según las exigencias de la precisión cuantitativa (cf. *supra*, p. 151). La exclusión total de los principios activos en las cosas que correspondían a las «naturalezas» escolásticas crearon una dificultad general para toda la doctrina de la causalidad. Estrictamente hablando, toda la causalidad «secundaria» (esto es, la

causalidad independiente de la intervención directa de Dios) se hizo imposible, como señalaron algunos seguidores de Descartes. Algunos autores, como, por ejemplo, Gassendi y sir Kenelm Digby (1603-1665), intentaron tratar este problema general retomando a una forma de atomismo, y, con cierta confusión, atribuyeron causalidad eficiente a los mismos átomos. Una solución hasta cierto punto distinta a todo el problema de la interacción fue propuesta por Leibniz con su teoría de las mónadas. Estas soluciones llegaron a ejercer un influjo considerable en Biología, donde la doctrina cartesiana de la materia había provocado un serio obstáculo al excluir absolutamente los organismos. Por ejemplo, cuando Maupertuis y Buffon (1707-1788) intentaron explicar con principios mecánicos hechos como los de la adaptación de las funciones de las partes de los seres vivos a las necesidades del todo, y las apariencias teleológicas del desarrollo embriológico y de la conducta animal se tornaron hacia esas partículas en las que la causalidad se alojaba en las *molécules organisées*. Maupertuis señaló muy claramente que los conceptos mecánicos formulados para explicar solamente una gama limitada de fenómenos inorgánicos debía esperarse que fueran inadecuados cuando se aplicaban a otros fenómenos para los que no estaban pensados. Puesto que los fenómenos biológicos parecían exigir a la vez principios activos y teleología, su solución consistía en ofrecer una explicación de ellos en términos del movimiento antecedente de las partículas, cuyo comportamiento anticipaba los fines hacia los que se movían y las funciones que debían ser servidas por los órganos que formaban. Al

desarrollar este tipo de explicación Maupertuis llegó a proponer la primera teoría sistemática de la evolución y a estudiar por primera vez en este contexto la producción del orden a partir del desorden por la acción del azar.

Fue en la cuestión de la interacción entre el cuerpo y la mente, entre la sustancia extensa absolutamente distinta y la sustancia pensante, donde el sistema cartesiano sacó a la luz el problema más insoluble para la filosofía mecanicista, y uno de los problemas que más profundamente ha afectado a toda la filosofía de la naturaleza desarrollada por los científicos, especialmente por los fisiólogos, desde el siglo XVII. Para la filosofía aristotélica no había, hablando estrictamente, ningún problema del *cuerpo* y la *mente*, porque el alma, el *animus* de los escolásticos, que incluía a la mente (cf. vol. I, página 150, nota 17), era la «forma» del ser humano, y determinaba la naturaleza de la unidad psicofísica de la misma manera que la forma de un cuerpo inanimado determinaba su naturaleza. El problema surgió con la concepción mecanicista del cuerpo. Joseph Glanvill escribía retóricamente en *The Vanity of Dogmatizing* (1661): «Cómo el espíritu más puro está unido a este trozo de tierra, es un nudo muy difícil de deshacer para la humanidad caída.»

Descartes estudió la cuestión principalmente en su *Traité de L'homme*, *Les passions de l'âme* y en los *Principia Philosophiae*. Su procedimiento para formularlo fue claro e inteligente. Aceptando la distinción entre espíritu (sensación, sentimiento, pensamiento) y materia (en cuanto concebida mecánicamente), decidió, por razones filosóficas, que en el cuerpo humano existía una interacción entre

ellos.

Las principales razones filosóficas de esta conclusión eran que no podemos negar la realidad, por ejemplo, del poder aparente del cuerpo para engendrar en nosotros sensaciones y sentimientos sin considerar a Dios como un embaucador, lo que sería incompatible con su perfección. Además, no había ninguna buena razón para negarla. Buscó, por consiguiente, una conexión entre la mente y el cuerpo en un mecanismo fisiológico apropiado, que colocó en la glándula pineal (cf. *supra*, pp. 215 y ss.).

Los críticos de la teoría de Descartes sobre la interacción, comenzando por Gassendi, señalaron que cualquier punto de contacto entre la sustancia extensa no pensante y la sustancia pensante inextensa, recíprocamente excluyentes, estaba excluida por definición. Esto llevó a reconsiderar los términos de la formulación de Descartes de la teoría de la interacción y al desarrollo de otras tres soluciones: paralelismo, materialismo y fenomenalismo. Desde entonces ha oscilado el problema entre esas cuatro posibilidades.

Históricamente la primera alternativa al interaccionismo cartesiano fue la forma de paralelismo conocida como «ocasionalismo». Desarrollada principalmente por Geulincx (1625-1669) y Nicolás Malebranche (1638-1715), esta doctrina atribuía toda la acción causal inmediatamente a Dios. Cuando un acontecimiento *A* parecía producir otro evento *B*, sostenían que lo que sucedía realmente era que *A* proporcionaba la ocasión para que Dios produjera voluntariamente *B*. Así, aunque un fenómeno físico que sucede en el

cuerpo pudiera parecer que produce una sensación en la mente, y un acto de la voluntad pudiera parecer que produce un movimiento del cuerpo, no hay de hecho nexo causal entre los dos acontecimientos, excepto que Dios produce a ambos. En estas actividades Dios seguía reglas fijas, de manera que era posible para los filósofos de la naturaleza formular leyes científicas generales. Era una posición semejante a la de Ockham (*vide supra*, p. 35).

La solución materialista al problema de la mente y el cuerpo fue un intento de conseguir la unidad de la teoría que pretende la Ciencia mostrando que los fenómenos mentales podían derivarse exhaustivamente de las leyes que gobiernan el comportamiento de la materia o reducirse a ellas. El primer autor moderno que propuso una teoría materialista de este tipo fue Thomas Hobbes (1588-1679). Es natural que desde el principio el materialismo estuviera asociado con el propósito de convertir una mitad de la dualidad cartesiana en un sistema de metafísica antiteológica que enarbolará la bandera de la Ciencia. El hombre se convirtió, en manos de los «fisiólogos» de la *Encyclopédie* francesa, como La Mettrie, D'Holbach, Condorcet y Cahanis, en nada más que una máquina; la conciencia se convirtió en una secreción del cerebro de la misma forma que la bilis era una secreción del hígado; y las leyes físicas y químicas tal como las concebían fueron tomadas como las normas de las leyes no sólo de la mente, sino también de la historia y el progreso histórico de la humanidad. Estas concepciones, que provenían directamente de la filosofía mecanicista cartesiana y de la física newtoniana y desarrolladas por los filósofos de la naturaleza y

sociólogos franceses del siglo XVIII, se convirtieron en los antecesores directos de las doctrinas materialistas asociadas a la teoría de la evolución de Charles Darwin y a sus extensiones sociológicas en la doctrina del progreso del siglo XIX.

La solución fenomenalista, o idealista, intentaba eliminar el dualismo cartesiano tomando como objetos primarios del conocimiento no las cosas del mundo externo conocido por medio de la sensación, sino los datos mismos de la sensación. El mundo físico era considerado entonces como una construcción mental a partir de esos datos, que existía solamente en la mente, aunque, como Berkeley argumentaba, la única mente en la que se podía decir con propiedad que existía era la mente de Dios. Es característico de esta doctrina que, en oposición al materialismo, estuviera asociada con el propósito de salvar la teología de las conclusiones que se estaban sacando de la Ciencia y de la filosofía mecanicista por autores orientados en la dirección contraria.

Todo el desarrollo de la Filosofía en relación a la Ciencia y de la filosofía de la Ciencia desde el siglo XVII es inteligible de manera apropiada solamente dentro del contexto más amplio de las creencias, en particular las teológicas, de la época. Sin duda el dualismo de los filósofos mecanicistas condujo a un sentimiento de profundo aislamiento del espíritu humano —que conoce la belleza, la conciencia y los placeres sencillos de las cualidades secundarias— en una infinidad inhumana de materia en movimiento. «Así el hombre es ese gran y verdadero anfibio — escribía sir Thomas Browne, señalando el contraste en *Religio Medici*

(1643) con su vivido barroco— cuya naturaleza está dispuesta a vivir no sólo como otras criaturas en diversos elementos, sino en mundos divididos y distintos.» Esto refleja un efecto de la sensibilidad que ciertamente forma parte de la llamada «crisis de conciencia», a la que dio lugar la revolución científica. Pero hubo también doctrinas teológicas específicas cuya influencia práctica sobre la filosofía del tiempo fue probablemente más importante. Por ejemplo, Descartes, actuando con sinceridad incuestionable, no perdió de vista la doctrina de la transustanciación al desarrollar su teoría de la materia y del cambio material. Cuando supo la condenación de Galileo apoyada en la fuerza de ciertos textos de las Escrituras, se preparó, con quizá menos incuestionable sinceridad, a cambiar toda su filosofía (cf. *supra*, pp. 194 y siguientes).

Sobre la posición en que Galileo y Descartes se encontraban respecto de la teología de su tiempo, da mucha luz el recordar los acontecimientos que siguieron a la introducción de la filosofía aristotélica en Occidente en el siglo XIII (cf. vol. I, pp. 60-61; *supra*, pp. 39-40).

El sistema aristotélico entró en circulación acompañado por las doctrinas averroístas de que el universo era una emanación necesaria de la razón de Dios, en lugar de una creación libre de su voluntad, como enseñaba la teología cristiana; de que las causas últimas racionales de las cosas en la mente de Dios podían ser descubiertas por la razón, y de que Aristóteles había descubierto de hecho tales causas, de modo que el universo debía estar necesariamente constituido como lo había descrito él, y no podía

estarlo de otro modo. Por medio de la doctrina cristiana de la inescrutabilidad y de la absoluta omnipotencia de Dios, los filósofos y teólogos del siglo XIII liberaron la investigación racional y empírica de las leyes que la naturaleza muestra de hecho cuando está sujeta absolutamente a un sistema metafísico. Sin embargo, el precio de esta liberación fue una sujeción mucho menos exigente a las doctrinas cristianas reveladas, y en particular a la verdad de la palabra (interpretada literalmente) en las Escrituras. Galileo, no menos que Oresme, estaba preparado para pagar este precio, aunque no con la moneda que se le puso a la fuerza en la mano. Lo que rechazaba era de hecho la moneda de Ockham, quien, en su ansiedad por salvar el contenido de la revelación de cualquier amenaza posible de parte de la razón, hizo un empleo radical y avanzado de la doctrina de la omnipotencia absoluta de Dios para destruir completamente el contenido racional de la Ciencia. Las regularidades observadas del mundo se convirtieron en meras regularidades de hecho, y las leyes que las expresaban pasaron a ser, en su sentido más firme, meras posibilidades, y en el más débil, simples artificios convencionales de correlación y cálculo.

La moneda que Galileo dejó caer cuando le fue ofrecida por Bellarmino y el Papa Urbano VIII, Descartes la cogió rápidamente. *Al principio de sus investigaciones filosóficas y científicas Descartes había escrito con la mayor confianza que era capaz de descubrir explicaciones verdaderas y últimas. Pero después de 1633 se convirtió en el philosophe au masque. Retiró de la impresión Le Monde, y en la versión revisada de su*

sistema publicada en los Principia Philosophiae, en 1644, hizo una famosa declaración de que las teorías científicas eran meras ficciones. «Deseo que lo que escribo se tome solamente como una hipótesis que quizá está muy alejada de la verdad; pero, aunque así fuese, creo que habré conseguido bastante si todas las cosas que se deduzcan de ella están totalmente conformes con las experiencias: pues si esto ocurre ella no será menos útil para la vida que si fuese verdadera, puesto que nos podremos servir de ella del mismo modo en la disposición de las causas naturales para producir los efectos deseados» (parte 3, sección 44). Continuaba (en la sección 45): «Supondré aquí algunas cosas que creo que son falsas.» Por ejemplo, creía que, como exigía la religión cristiana, Dios había creado el mundo completamente al principio, y esto era razonable con la omnipotencia de Dios. Pero podríamos a veces entender mejor las naturalezas generales de las cosas suponiendo hipótesis que no creemos que son verdaderas literalmente; por ejemplo, que todos los organismos vienen de semillas, «aunque sabemos que no han sido producidos de esa forma, si tenemos que describir el mundo solamente como es o, más bien, como creemos que ha sido creado». Concluía en la sección 47; «Su falsedad no impide que lo que pueda ser deducido de ellas sea verdadero.»

La estrategia indicada en este pasaje, la estrategia de Ockham, de Osiander, de Bellarmino, estaba orientada principalmente no a

interpretar las formulaciones teóricas de la Ciencia, sino a conseguir una tolerancia entre ellas y la teología cristiana. Apuntaba a mostrar que no sólo el desarrollo de una metafísica antiteológica no era una consecuencia necesaria de la filosofía mecanicista de la Ciencia, sino que la Ciencia era de hecho incapaz en absoluto de proporcionar una metafísica. Adoptada por prudencia, está situada extrañamente en el conjunto de la visión filosófica de Descartes. Suministraba una cláusula de escape que permitía proseguir la práctica de la Ciencia aun frente a proposiciones teológicas a las que podía parecer contradecir.

Muchos otros aspectos del pensamiento del siglo XVII reflejan la misma tendencia a evitar dificultades separando lo más posible los problemas científicos de los entrecruzamientos teológicos y metafísicos. Se puede ver en el ocasionalismo un ejemplo de esto, porque como la voluntad de Dios es inescrutable, el ocasionalista se queda de hecho solamente con la observación y la correlación como los objetivos propios de la investigación científica.

El rehusar estudiar las «causas» en sus investigaciones físicas se convirtió en una característica de muchos científicos de la época, de Mersenne, Pascal, Roberval, Mariotte; y de la misma forma la Royal Society, evitando conscientemente los temas discutidos, se hizo cada vez más predominantemente experimental. La misma estrategia de separar la ciencia de la naturaleza de las cuestiones de las últimas causas fue expresada por Boyle cuando escribía en *The Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis* (Works, resumido por Peter Shaw, 1725, vol. I, p. 187): «La filosofía que

propongo no llega sino a cosas puramente corpóreas; y distinguiendo entre el primer origen de las cosas y el curso subsiguiente de la naturaleza enseña que Dios... estableció estas reglas del movimiento y ese orden primer origen de las cosas y el curso subsiguiente de la naturaleza, Así, habiendo sido estructurado el mundo por Dios una vez y establecidas las leyes del movimiento y todo mantenido por su concurso perpetuo y su providencia general..., los fenómenos del mundo son producidos físicamente por las propiedades mecánicas de las partes de la materia.»

Tal como se desarrollaron los acontecimientos, ninguno de estos intentos de evitar problemas teológicos tuvo éxito en sus objetivos.

El progreso de la Ciencia dio lugar de hecho a la aparición de la metafísica materialista, ingenua ciertamente, pero que iba a tener un gran influjo en los siglos XVIII y XIX, y por definición antiteológica.

El Dios de los científicos, de Boyle, el «ser inteligente y poderoso» alabado por Newton en los *Principia*, cuando se lo apropiaron los deístas del siglo XVIII, ya no dio más primacía o unicidad al cristianismo entre las religiones. La estrategia «ficcionalista» o «convencionalista» adoptada por Descartes y propuesta por Berkeley, la más corrosiva de todas, se convirtió en manos de los filósofos seculares, como David Hume (1711-1776) y Emmanuel Kant (1724-1804), en el origen de una doctrina que era a la vez antirrational y antiteológica. Aplicada universalmente, como inevitablemente lo fue, dejó de ser una defensa de la Teología contra

la Ciencia y se convirtió en una amenaza para todo el conocimiento, ya fuese racional o revelado. Estaba abierto el camino para el positivismo explícitamente antiteológico y antimetafísico de Augusto Comte (1798-1857) v John Stuart Mili (1806-1873) y para el agnosticismo de T. H. Huxley, que vinieron a ser una parte tan característica del ambiente filosófico de la Ciencia en el siglo XIX. Esto fue una consecuencia del influjo de sus carreras intelectuales en la que ni Galileo ni Descartes se hubieran complacido, aunque hasta cierto punto la previeron.

Sería un engaño dar la impresión de que todo el estudio de la filosofía de la Ciencia en los siglos XVII y XVIII estaba orientado solamente a tomar una actitud respecto de la Teología. Dejando de lado el objeto puramente teológico de Bellarmino y Descartes, el problema para los filósofos llegó a ser el de la relación del conocimiento científico con la posibilidad del conocimiento en general. Desde la época de Descartes la justificación de las hipótesis, procedimientos y conclusiones de la nueva ciencia se hizo una parte esencial del problema general del conocimiento, que incluía las cuestiones de encontrar explicaciones (en cuanto distintas de las meras predicciones) en la Ciencia y de la posibilidad de la teología racional. Todos los grandes filósofos después de Descartes, en particular Leibniz, Berkeley, Kant y Mili, contribuyeron profundamente a la filosofía de la Ciencia, y ellos mismos fueron influenciados por sus análisis del pensamiento científico.

Los estudios de problemas en este campo, realizados por los mismos

científicos, no fueron menos importantes tanto para la atmósfera general filosófica engendrada por la Ciencia como para la filosofía de la Ciencia. Aunque éstos pueden ser entendidos solamente dentro de un contexto filosófico más amplio, tenían de hecho un objeto distinto. Donde los filósofos estaban interesados primordialmente por la Ciencia en relación al problema general del conocimiento, los científicos se interesaron habitualmente por la filosofía de la Ciencia primordialmente en relación a los problemas específicos encontrados en el curso de su tarea científica. Muchos de éstos no eran esenciales para una solución puramente científica. Por ejemplo, no es necesario estudiar el problema mente-cuerpo para investigar la fisiología del cerebro y los órganos de los sentidos, o estudiar la admisibilidad de la acción a distancia para investigar las leyes del movimiento planetario. Sin embargo, era necesario que los investigadores que buscaban explicaciones de la Ciencia estudiaran esos problemas. Sin duda, a causa de sus objetivos diferentes se puede ver en embrión —ya en el siglo XVII— la dicotomía del siglo xx entre la filosofía de la Ciencia de los científicos y la de los filósofos. Cada una tiende más y más a ignorar la otra, la división se consolidó prácticamente en todos los sistemas educativos europeos en el siglo XIX, con desventaja creciente para todos.

Los estudios de la filosofía de la Ciencia, por parte de científicos que influyeron más profundamente en el desarrollo del pensamiento científico en el siglo XVII, se orientaban todos a la relación entre las teorías específicas formuladas con el propósito de predecir fenómenos particulares y la filosofía mecanicista de la naturaleza,

en cuyos términos se había supuesto que debían darse todas las explicaciones en la Física. De hecho, el problema era parecido al que existía entre las teorías predictivas de los siglos XIII y XIV y la filosofía aristotélica de la naturaleza. En la época en que la Royal Society recibió su primera Carta en 1662 y se creó la Académie des Sciences en 1666, las actitudes respecto de los problemas tendieron a polarizarse alrededor de las dos filosofías de la Ciencia dominantes en la época: el empirismo y experimentalismo inspirados en Bacon y Galileo con su desagrado inveterado por los sistemas, y el racionalismo cartesiano con su concepción unificadora de principios universales que se aplican a todos los aspectos del mundo físico. La primera fue la que siguió la mayoría de los ingleses y la segunda tuvo sus mayores defensores en Francia y en Holanda, pero de hecho ningún filósofo de la naturaleza escapó al influjo de ambas. La filosofía de la Ciencia de los científicos, en cuanto distinta de la de los filósofos, recibió su expresión más característica de la escuela experimental inglesa, especialmente de Boyle y Newton. Estos estaban tan convencidos como Galileo de que la Ciencia descubría en sus teorías conocimiento genuino sobre el mundo real y objetivo de la naturaleza. Pero mientras el descubrimiento de explicaciones y de causas reales permanecía siendo su última meta, siguieron una seria estrategia de distinguir tajantemente entre las leyes establecidas experimentalmente que proporcionaban predicciones exactas y las hipótesis de la filosofía de la naturaleza aceptada. Estuvieron siempre preparados para dejar de lado detalles de esta última, especialmente los añadidos

especulativamente por Descartes. Así ellos objetaron igualmente la idea de que las teorías científicas eran meras ficciones o artificios de cálculo, y al nuevo escolasticismo en que los seguidores menores de Descartes cristalizaron su sistema mecanicista. Su contribución real a la filosofía de su tiempo y a toda filosofía de épocas siguientes de la Ciencia fue su empleo sistemático del principio experimental de la verificación y refutación para distinguir claramente entre los diferentes tipos de afirmaciones implicadas en el sistema científico. La actitud adoptada por esta escuela experimental fue bien caracterizada por William Wotton en 1694 en sus *Reflections upon Ancient and Modern Learning*: «Y, por tanto —escribía en el capítulo 20—, para que no se pueda pensar que confundo cada noción plausible de un filósofo ingenioso con un nuevo descubrimiento de la naturaleza, debo desear que mi anterior distinción entre hipótesis y teorías sea recordada. No considero aquí las diferentes *hipótesis* de Descartes, Gassendi o Hobbes como adquisiciones de conocimiento real, puesto que sólo pueden ser quimeras y nociones divertidas aptas para entretener cabezas laboriosas. Sólo aduzco esas doctrinas tal como surgen de experimentos fieles y de observaciones precisas; y esas consecuencias son resultados inmediatos y corolarios manifiestos de esos experimentos y observaciones: que es lo que habitualmente se entiende por *teorías*». Fue Newton, al convertirse en el maestro reconocido de la filosofía experimental, quien consiguió la apreciación más clara de la relación entre los elementos empíricos de un sistema científico y los elementos hipotéticos derivados de una filosofía de la naturaleza.

Newton no escribió una filosofía sistemática de la Ciencia, pero al igual que Galileo se vio obligado a estudiar el método científico por las controversias que suscitaron sus teorías del color y de la gravitación. Ambas eran consideradas por los críticos cartesianos, especialmente por Huygens y Leibniz, como meramente descriptivas y predictivas, pero no explicativas. Presentadas en el contexto de la controversia y siempre en relación con problemas específicos, sus afirmaciones llevaron a una incompreensión considerable. Pero ellas indican claramente una línea de conducta completamente coherente. Obligado a entrar en la discusión por las críticas de Huygens a su «*New Theory about Light and Colours*», publicada en las *Philosophical Transactions of the Royal Society* en 1671-1672, fue en esta controversia donde Newton adoptó por primera vez su posición característica. Señaló en primer lugar que su investigación de las leyes de los fenómenos era independiente de cualquier investigación de las causas o procesos mecánicos que las producían; en segundo lugar, que solamente después de establecidas experimentalmente las leyes de los fenómenos como datos que debían ser explicados podía comenzar la investigación de la explicación con esperanza de éxito; y en tercer lugar, que ninguna ley establecida experimentalmente podía ser refutada porque fuera contradicha por una hipótesis acerca de las causas de los fenómenos. Como escribía el 2 de junio de 1672 a Henry Oldenburg, secretario de la Royal Society, en una carta impresa en la edición de Samuel Horsley de las *Opera* de Newton (1782, vol. IV, pp. 314-315):

Porque el mejor y más seguro método de filosofar parece ser, primero investigar diligentemente las propiedades de las cosas y establecerlas por el experimento, y buscar luego las hipótesis para explicarlas. Porque las hipótesis deben ser adecuadas meramente para explicar las propiedades de las cosas y no intentar predeterminarlas, excepto en la medida en que puedan ser una ayuda para el experimento. Si alguien ofrece conjeturas sobre la verdad de las cosas a partir de la mera posibilidad de las hipótesis, no veo cómo cualquier cosa puede ser determinada en cualquier ciencia; porque siempre es posible imaginar hipótesis, una tras otra, que se revelan ricas en nuevas tribulaciones. Por ello juzgaba que uno debe abstenerse de considerar hipótesis como de un argumento falaz, y que la fuerza de su oposición debe ser eliminada, para que uno pueda llegar a una explicación más madura y más general.

Iba a repetir los mismos puntos de nuevo en defensa de su teoría de la gravitación, en la cuestión 31 de la *Opticks* (1706) y en las *Rules of Reasoning in Philosophy (Reglas del razonamiento en Filosofía)*, en particular en la regla IV (1726), al comienzo del tercer libro de los *Principia*.

Desde esta posición eminentemente razonable Newton llevó claridad a todo el tema del método y la lógica científica, y estableció una línea de acción que era a la vez crítica y fructífera para tratar la relación entre los datos y las leyes de los fenómenos, por una parte, y las hipótesis sobre las causas por otra. Gracias a esa estrategia

mostró cómo las hipótesis mecánicas podían ser una guía provechosa en la investigación sin convertirse en engañosas. Probablemente porque no se engañó acerca de su *status* hipotético —donde otros proponían una explicación y la defendían contra todas las objeciones—, su fértil inteligencia sugería toda una gama de hipótesis; por ejemplo, del éter como una explicación de los fenómenos de la luz, de la gravitación, de la cohesión, de la atracción eléctrica y magnética. Newton, lejos de excluir de la competencia de la Ciencia el descubrimiento de los procesos reales de la naturaleza que provocaban las leyes de los fenómenos, tomó éstas tan en serio como el objetivo último de la investigación científica, que insistió en que la investigación de las causas debía ser llevada tan rigurosamente como la de las mismas leyes. «Hay, por tanto, agentes en la naturaleza capaces de hacer que las partículas de los cuerpos se agreguen por medio de atracciones muy fuertes —declaraba en la cuestión 31 de la *Opticks*—, y es la tarea de la filosofía experimental encontrarlos.» El famoso aforismo *hypotheses non fingo*, en el Escolio General al final del libro 3, en la segunda edición de los *Principia* (1713), estaba dirigido, como ha señalado Koyré, no contra las hipótesis acerca de las causas reales, sino contra las ficciones y ficcionalismo cartesianos. Es probable que eligiera el título de *Principia Mathematica* con el fin de dar directamente fuerza a su polémica contra los *Principia Philosophiae* de Descartes. Newton, pues, daba la vuelta al reproche de Descartes a Galileo por no dar explicaciones, y lo hizo por medio de los propios métodos de Galileo en la Ciencia, que él llevó a su culminación.

Newton no consideraba las leyes científicas como meros artificios predictivos. Estaban escritas en los fenómenos, aunque no estuvieran abiertas para la inspección directa y tuvieran que ser descubiertas o «inferidas» o «deducidas» de los fenómenos por análisis apropiados experimentales y matemáticos. En el sentido de que buscaba explicaciones verdaderas, Newton perseguía los mismos objetivos que Aristóteles y que todos sus descendientes intelectuales. Pero las «naturalezas» aristotélicas ofrecían explicaciones divorciadas de las leyes predictivas. Fue este divorcio lo que ocasionó toda la discusión entre la predicción y la explicación desde el siglo XIII y llevó a la sustitución de la física de Aristóteles por la filosofía de la naturaleza matemática y mecánica. Como escribía Newton de las «naturalezas» aristotélicas en la cuestión 31 de la *Opticks*, haciéndose eco de Galileo:

Esas cualidades ocultas pusieron un freno al desarrollo de la filosofía de la naturaleza y, por tanto, han sido rechazadas en los últimos años. Decirnos que cada especie de cosas está dotada de una cualidad específica oculta por la que actúa y produce sus efectos manifiestos, es no decirnos nada; pero derivar dos o tres principios generales del movimiento de los fenómenos, y decirnos después cómo las propiedades y acciones de todas las cosas corpóreas se siguen de estos principios manifiestos, sería un gran paso en la Filosofía, aunque las causas de estos principios no hubieran sido descubiertas aún; y, por tanto, no tengo escrúpulos en proponer los principios del movimiento antes mencionado, siendo de una extensión muy

general, y dejar sus causas por descubrir.

Newton quería, aplicando los mismos métodos rigurosos cuantitativos tanto a las hipótesis sobre las causas como a las leyes, señalar el camino hacia la meta de toda la escuela experimental de la filosofía de la naturaleza: la unión de la teoría explicativa y de las leyes predictivas en un único sistema teórico. Así, habiendo resuelto, por medio de sus leyes del movimiento y de la gravitación, el problema de la dinámica de los cuerpos macroscópicos de la tierra y los cielos, escribió en el prefacio de la primera edición de los *Principia*: «Deseo que pudiéramos derivar el resto de los fenómenos de la naturaleza por el mismo tipo de razonamiento a partir de principios mecánicos, porque soy inducido por muchas razones a sospechar que todos ellos pueden depender de ciertas fuerzas por las que las partículas de los cuerpos, por algunas causas desconocidas hasta ahora, son o impelidas mutuamente unas hacia otras, y se agregan en figuras regulares, o son repelidas unas de otras. Siendo estas fuerzas desconocidas, los filósofos han intentado hasta ahora en vano la investigación de la naturaleza; pero espero que los principios establecidos proporcionarán alguna luz o a éste o a algún método más verdadero de Filosofía.»

Dos pasajes más indican la continuidad de la estructura lógica de su ciencia con la larga tradición que se extiende hacia atrás a través de Galileo y los autores medievales sobre el método «resolutivo-compositivo» hasta los geómetras griegos (cf. *supra*, p. 22). En la cuestión 31 de la *Opticks* escribía:

Tanto en matemáticas como en filosofía de la naturaleza, la investigación de las cosas difíciles por el método de análisis debe preceder al método de composición. Este análisis consiste en hacer experimentos y observaciones, y en sacar conclusiones generales de ellos por inducción, y en no admitir ninguna objeción contra las conclusiones a no ser las que se toman de los experimentos o de otras verdades ciertas. Porque las hipótesis no han de ser consideradas en la filosofía experimental⁴⁹. Y aunque el argumentar a partir de los experimentos y de las observaciones por inducción no sea demostración de conclusiones generales, es, sin embargo, la mejor forma de argumentar que admite la naturaleza de las cosas, y puede ser considerada tanto más fuerte cuanto la inducción es más general. Y si no se da ninguna excepción de los fenómenos, la conclusión puede ser enunciada en forma general. Pero si en alguna ocasión después sucede alguna excepción a partir de los experimentos, se puede entonces comenzar a enunciarla con las excepciones que se producen. Por este medio de análisis podemos proceder de los compuestos a los ingredientes y de los movimientos a las fuerzas que los producen; y en general, de los efectos a sus causas, y de las causas particulares a las más generales, hasta que el argumento acaba en lo más general. Este es el método de análisis. Y la síntesis consiste en suponer las causas descubiertas, y establecidas como principios, y por ellas explicar los fenómenos que proceden de ellas y probar las explicaciones.

Contestando a Roger Cotes en 1712, que estaba viendo la segunda edición de los *Principia* (1713) en la imprenta, Newton escribía para clarificar más su concepción de la distinción que se debía hacer entre las diferentes proposiciones de un sistema científico. Su propósito era explicar la frase *hypotheses non fingo* en el Escolio General. Escribía:

... como en Geometría el término hipótesis no está tomado en un sentido tan general para incluir los axiomas y postulados, de la misma manera en la filosofía experimental no ha de ser tomado en un sentido tan amplio que incluya los primeros principios o axiomas que yo llamo las leyes del movimiento. Esos principios son deducidos de los fenómenos y se hacen generales por la inducción: que es la mayor evidencia que una proposición puede tener en esta filosofía. Y el término hipótesis es usado aquí por mí para significar una proposición tal que no es ni un fenómeno ni es deducida de ningún fenómeno, sino presumida y supuesta sin ninguna prueba experimental.

En un caso Newton parece haber significado que las leyes (o «principios») eran «deducidos de los fenómenos» en sentido estricto y literal, porque demostró que de la misma manera que las leyes planetarias de Kepler podían deducirse de las leyes del movimiento y de la ley de los inversos de los cuadrados de la gravitación, así mismo esta última podía ser deducida de la tercera ley de Kepler que describía el fenómeno. Lo que hizo en realidad fue demostrar

una implicación recíproca entre una ley más general y una menos general; sus otras afirmaciones muestran que reconoció claramente que esto no se aplica a la relación entre una ley y los datos de los fenómenos. En la búsqueda de certeza en la Ciencia, la relación recíproca representaba un ideal derivado de la matemática (cf. *supra*, páginas 34, 175, 179). El propósito de la distinción de Newton, manifestando claramente la concepción «euclidiana» de la estructura de la ciencia teórica establecida por la larga tradición que él había heredado, era establecer explícitamente el grado en que se podía decir que se habían verificado los primeros principios de una ciencia y de una explicación. En las controversias sobre esta cuestión a la que le habían llevado su explicación del color y del movimiento planetario, su estrategia fue la de rechazar, por una parte, las hipótesis propuestas como ficciones explícitas, y por otra, el uso de hipótesis de cualquier tipo como objeciones a las leyes establecidas experimentalmente, contra las que las únicas objeciones no podían ser más que la evidencia experimental contraria o la prueba de la inconsistencia lógica. Así concluía finalmente en la regla IV del libro 3 de la tercera edición de los *Principia* (1726): «En la filosofía experimental debemos buscar proposiciones inferidas por inducción general (*per inductionem collectae*) como exactamente o muy próximas a la verdad, sin que obste cualquier hipótesis contraria que pudiera ser imaginada, hasta el momento en que sucedan otros fenómenos por los que ellas puedan o hacerse más exactas o sujetas a excepciones. Debemos seguir la regla de que el argumento de la inducción no puede ser

burlado por hipótesis.»

Otro pasaje bien conocido del prefacio al *Traité de la Lumière* (1690) de Huygens muestra en qué manera se había alejado el método de razonamiento de la nueva física del siglo XVII de la concepción griega de la demostración geométrica. En lugar de la justificación de las conclusiones mostrando que eran consecuencias deducidas necesariamente de los primeros principios aceptados como axiomáticos, la atención era transferida ahora a la justificación de los mismos principios teóricos por medio de sus consecuencias observables. Se ha afirmado que la comprobación por las consecuencias consigue no la certeza, sino sólo probabilidad. La probabilidad de que una teoría sea verdadera se dice que aumenta con el número y rango de las comprobaciones, especialmente en la predicción de nuevos fenómenos. Y se pretende que este método nos permite descubrir las causas de los fenómenos. Huygens escribía: «Se ha de encontrar aquí un tipo de demostración que no produce una certeza tan grande como la de la Geometría, y que es en verdad muy distinta de la empleada por los geómetras, puesto que ellos demuestran sus proposiciones por medio de principios ciertos e incontestables, mientras que aquí los principios son comprobados por las consecuencias derivadas de ellos. La naturaleza del tema no permite ningún otro tratamiento. Sin embargo, es posible alcanzar de este modo un grado de probabilidad que con frecuencia es escasamente menos que la certeza completa. Esto sucede cuando las consecuencias de nuestros principios supuestos concuerdan perfectamente con los fenómenos observados, y especialmente

cuando esas confirmaciones son numerosas, pero sobre todo cuando podemos imaginar y prever nuevos fenómenos que se seguirán de las hipótesis que empleamos y se ve luego que nuestras expectativas se cumplen. Si en el tratado siguiente se encuentran juntas todas estas evidencias de la probabilidad, como creo que lo están, esto debe ser una confirmación muy fuerte del éxito de mi investigación, y es escasamente posible que las cosas no sean casi exactamente como me las he representado. Me aventuro a esperar, por tanto, que quienes gozan hallando las causas de las cosas y pueden apreciar las maravillas de la luz se interesarán por estas diferentes especulaciones sobre ellas.»

Durante dos siglos se ha defendido generalmente por los científicos que Newton consiguió una unión entre la predicción y la explicación precisamente del mismo tipo que todos habían estado buscando, pero ya entre los primeros críticos de Newton hubo filósofos que no compartieron su optimismo de que la Ciencia pudiera descubrir las «causas» en absoluto. El mismo Newton había subrayado la tajante distinción empírica que existía *de hecho* entre el conocimiento de las leyes y el de las causas, tal como las consideraba la filosofía corriente de la naturaleza. Recordando la conclusión obtenida por los lógicos escolásticos desde Grossetesta hasta Zabarella y Nifo de que los datos de la observación no pueden determinar unívocamente la teoría que los explica, algunos filósofos del siglo XVIII comenzaron a ver los resultados de la investigación científica menos como descubrimientos acerca de la naturaleza que como productos de los métodos de pensamiento empleados.

El crítico más agudo de los contemporáneos del sistema de Newton fue Berkeley, que en su *De Motu* (1721) anticipó mucho del famoso análisis de Mach de las hipótesis básicas de Newton. Berkeley, desarrollando argumentos parecidos a los empleados por los lógicos medievales, llegó a la conclusión de que ni el sistema newtoniano ni otra teoría científica podían dar una explicación de la «naturaleza de las cosas» o establecer las causas de los fenómenos. Ese sistema físico era una «hipótesis matemática»; establecía meramente las «reglas» por las que se observaba que los fenómenos estaban conectados y por medio de las cuales podían ser predichos. Berkeley pretendió que no existía justificación de la concepción de Newton sobre el espacio y el tiempo absolutos y que todo el movimiento era relativo.

Hume, el Ockham del siglo XVIII, fue todavía más allá que Berkeley al pretender que la Ciencia era irracional y que la explicación era imposible estrictamente hablando. Puesto que los datos empíricos no aportaban su propia explicación o daban fundamento para creer en la causalidad, y puesto que él no podía ver otros fundamentos, concluyó que no había nada objetivo en la necesidad causal más allá de la concomitancia y secuencia regulares. En la sección 4 de su *Inquiry Concerning Human Understanding* declaraba: «En una palabra, pues, todo efecto es un acontecimiento distinto de su causa. No podría, por tanto, ser descubierto en la causa; y la primera invención o concepción de ella, *a priori*, debe ser enteramente arbitraria.»

Buffon (1707-1788) y otros biólogos en sus críticas al sistema

«realista» de Linneo de clasificación desarrollaron una visión «nominalista» análoga de las categorías biológicas acerca de las especies. Buffon declaraba que la naturaleza sólo contenía individuos; que las especies, definidas como la sucesión de individuos capaces de cruzamiento, era una categoría real; pero la «familia» y las categorías superiores eran meros nombres.

Alertado por la crítica de Hume, creyendo, sin embargo, firmemente en la verdad del sistema newtoniano, a cuya extensión contribuyó de hecho como físico, Kant se encontró a sí mismo capaz de aceptar la ciencia de Newton como verdadera al precio de negar que hubiera descubierto un mundo real de la naturaleza detrás del mundo de la apariencia. De la misma forma se vio obligado a negar la posibilidad de un conocimiento racional de Dios, en el que también creía firmemente. Kant pudo admitir la ciencia newtoniana como verdadera precisamente porque llegó a considerar a la misma naturaleza como el mundo de los fenómenos, el mundo como aparecía a nuestra mente asimiladora, y porque llegó a considerar las teorías científicas como productos de la estructura de nuestra mente. A causa de esa estructura Kant creía que el científico abordaba la naturaleza con ciertos principios necesarios en la mente, de los que las proposiciones de Euclides eran formulaciones explícitas, y que presuponía necesariamente estos principios en todo su conocimiento y en todas las teorías con que intentaba organizar su experiencia. Fue esta concepción de la Ciencia la reflexión de una situación filosófica producida por el éxito de la revolución científica, captada por una inteligencia agudamente

consciente de los procesos de la construcción teórica, la que Kant describió en el prefacio de la segunda edición de la *Critica de la razón pura* (1787):

Cuando Galileo dejó caer por un plano inclinado bolas de un peso determinado que había fijado él mismo, o cuando Torricelli hizo que el aire tuviera un peso, que había previamente determinado como igual al de un volumen de agua definido, o cuando, más tarde, Stahl cambió el metal en cenizas, y las cenizas en metal de nuevo, retirando y restituyendo algo, una nueva luz bruscó sobre todos los estudiosos de la naturaleza. Comprendieron que la razón terca intuición de sólo lo que ella misma producía en su propio plano y que ¿la debía moverse hacia adelante con los principios de sus juicios, según una ley fija, y obligar a la naturaleza a responder a sus preguntas; pero no dejar que ella misma fuera conducida por la naturaleza, como si fuera con rienda, porque, de otra forma, las observaciones accidentales, realizadas sin ningún plan prefijado, nunca convergerían hacia una ley necesaria, que es la sola cosa que la razón busca y exige. La razón, teniendo en una mano los principios, según los cuales sólo los fenómenos concordantes pueden ser admitidos como los de la naturaleza, y en la otra mano los experimentos, que ha diseñado teorizaría estos principios, debe acercarse a la naturaleza para ser instruida por ella; pero no bajo la forma de discípulo que está de acuerdo con todo lo que al maestro le gusta, sino como constituido en juez que obliga a los testigos a responder a las preguntas que él mismo hace. Por

tanto, incluso toda la deuda de la Física debe la benéfica revolución de su aspecto al feliz pensamiento de que debemos buscar en la naturaleza (y no introducir en ella por medio de la ficción) cualquier cosa que la razón debe aprender de la naturaleza, y no podría conocer por sí misma, y que debemos hacer esto de acuerdo con que la razón misma ha colocado originariamente en la naturaleza. Solamente así ha entrado el estudio de la naturaleza en el método seguro de una deuda, después de no haber hecho durante muchos siglos sino ir a tientas en la oscuridad⁵⁰.

Todas las filosofías de la Ciencia subsiguientes que se han desarrollado en los siglos XIX y XX han tomado su forma en una dirección u otra de las doctrinas desarrolladas desde Francis Bacon, Galileo y Descartes hasta Kant. Por ejemplo, era un paso fácil el que iba de la idea de Kant de que las teorías no se leen en la naturaleza, sino que se elaboran según nuestra idea de la naturaleza, a la afirmación de Augusto Comte de que la meta auténtica de la Ciencia era y había sido siempre no el conocimiento, sino solamente el poder (cf. *supra*, p. 278). Apropiándose de sólo una mitad de la *Magna Instauratio* de Bacon, Comte declaraba en su *Cours de philosophie positive* (1830), en la primera lección, que el objeto de la Ciencia era *savoir, pour prévoir* (saber para prever); de hecho, la predicción que da el control. Esto exigía solamente conocimiento de las consecuencias empíricas, y buscar el conocimiento de la naturaleza de las cosas más allá era no solamente inútil, sino

inalcanzable. John Stuart Mili, el amigo de Comte, elaboró su propia exposición sistemática del método científico para proporcionar medios seguros de establecer esas conexiones empíricas. Por otro lado, la exposición de Kant de la investigación científica, no como una mera disección de la naturaleza, sino como un proceso de interrogación activo a la luz de principios preconcebidos, fue utilizada por William Whewell en su acentuación, contra Comte y Mili, del papel de las «ideas» e hipótesis en la investigación científica. Volviendo al *argomento ex suppositione* y al método «resolutivo-compositivo» de Galileo, se ha señalado el mismo aspecto por los críticos recientes de Mili al subrayar la estructura «hipotético-deductiva» de la Ciencia. El «convencionalismo» del siglo XX —resultado inmediato en gran parte de desarrollos internos de la Física, que llevó al abandono de algunos principios básicos de Newton y al empleo de geometrías no-euclidianas para «salvar las apariencias»— es a la vez un avance respecto a la posición alcanzada por Kant y un retorno a posiciones más antiguas. Al liberarse la Física al menos de la necesidad de asumir los principios de Euclides, especialmente por influjo de Mach, Henri Poincaré y Duhem, se ha desarrollado la idea de que cualquier sistema teórico puede ser utilizado para relacionar la experiencia, a condición de que resista la prueba de la coherencia lógica y la verificación experimental. Abrazando los intentos realizados desde Simplicio a Bellarmino para dar sentido al estado de la teoría astronómica antes de Kepler, los intentos de esta escuela para tratar un problema análogo moderno han hecho de la

elección de un sistema, aparte de estas pruebas, una cuestión de mera convivencia y convención.

Al comienzo de la aventura filosófica europea —la búsqueda de la inteligibilidad racional del mundo como lo experimentamos— las Musas de Hesíodo anunciaban sombríamente: «Sabemos cómo decir muchas ficciones que tienen visos de verdad; pero sabemos también cómo declarar la verdad cuando queremos.» Careciendo del don de comprensión del oráculo, las personas que condujeron de hecho la aventura desde los tiempos griegos han sido capaces por sí mismas de hacer esta distinción filosófica únicamente buscando no sólo la verdad, sino también los principios que la distinguen de la falsedad. Desde que los griegos dieron el paso decisivo en la cosmología de buscar explicaciones deductivamente conectadas con los medios de predicción —el paso por el que establecieron la tradición científica europea en cuanto distinta de, por ejemplo, la astronomía babilónica, en la que había una completa disyunción entre la tecnología predictiva altamente desarrollada y los mitos que hacían las veces de explicación—, el problema de encontrar criterios para distinguir las verdaderas explicaciones de las falsas ha sido una cuestión de primera importancia en el crecimiento de la Ciencia. Buscando, como ellos hacían, tanto el saber como la utilidad, los griegos establecieron la ciencia europea como una actividad filosófica diferente, a la vez, de la tecnología oriental, que ignoraba en gran manera la Ciencia, y de la tecnología occidental, que es ciencia aplicada.

En esa empresa las concepciones de la verdad científica han sufrido

inevitablemente cambios por el impacto a la vez de los problemas internos de la Ciencia y por las críticas filosóficas. Pero a través de la diversidad de esas concepciones y de los logros reales de la Ciencia, desde Platón hasta el presente, la estrategia filosófica de la Ciencia ha continuado siendo básicamente la misma. No podría haber mejor testimonio explícito de ello que el suministrado por el período estudiado en las páginas precedentes. Aparentemente tan repleto de elucubraciones metafísicas y teológicas, incluso éstas se convirtieron en explicaciones satisfactorias, primero en la concepción de un sistema de explicación racional como tal, y, finalmente, en las grandes formulaciones teóricas del período de Galileo y Kepler. El proceso creador del descubrimiento y la invención originales, siempre misterioso, está tan poco abierto para una inspección directa como las propias leyes de la naturaleza. Es una parte de la iluminación filosófica proporcionada por la historia de la Ciencia el descubrir que el pensamiento de los grandes innovadores, cuya eficacia admiramos, estaba organizado según un patrón por muchos conceptos tan diferente del nuestro, que aceptaron un complejo de concepciones no empíricas y de «creencias reguladoras» que, por ajenas que nos sean, dieron, sin embargo, construcción y forma a teorías del mayor poder predictivo y explicativo. Pero es una segunda parte de la iluminación el descubrir que, a pesar de las apariencias inmediatas, la política para tratar esa norma de pensamiento, los criterios de verificación y el objetivo hacia el que tendían, ha conservado su continuidad esencial a través de toda la tradición europea.

Proponiendo teorías como verdaderas, pero siempre sometiéndolas a la comprobación experimental, la intuición que ha gobernado la tradición científica ha sido caracterizada por Pascal en sus *Pensamientos* (395): «Poseemos una impotencia de probar, invencible a todo dogmatismo. *Poseemos una idea de la verdad, invencible a todo pirronismo.*» Equilibrada entre la intuición y la razón, entre la imaginación y el experimento, la opinión filosófica en relación con la Ciencia ha oscilado entre los extremos del escepticismo y el racionalismo según que las pretensiones de haber descubierto definitivamente la realidad —poniendo así fin a toda investigación ulterior— o las pretensiones de que no es posible ningún conocimiento en absoluto —reduciendo la Ciencia a una tecnología irracional— presentaran más peligro para las esperanzas del momento. «Porque, ¿quién prescribe límites a la inteligencia y a la invención humanas?», preguntaba Galileo, el científico realista, en 1615. «¿Quién afirmará que todo lo que es sensible y cognoscible en el mundo está ya descubierto y conocido?» Es gracias al desarrollo de esta estrategia pragmática de tomar cada caso independientemente por sus propios méritos, de rehusar los límites de la propia construcción, como la revolución científica arroja su luz más significativa no sólo sobre la propia naturaleza de la Ciencia, sino también sobre todos esos otros aspectos del pensamiento moderno europeo que han surgido de una actitud adoptada respecto de sus métodos y conclusiones.

Láminas



Lámina 1. Nicolás de Oresme con una esfera armilar. De Le livre du ciel du monde, Biblioteca Nacional, París, MS français 565 (siglo XIV)

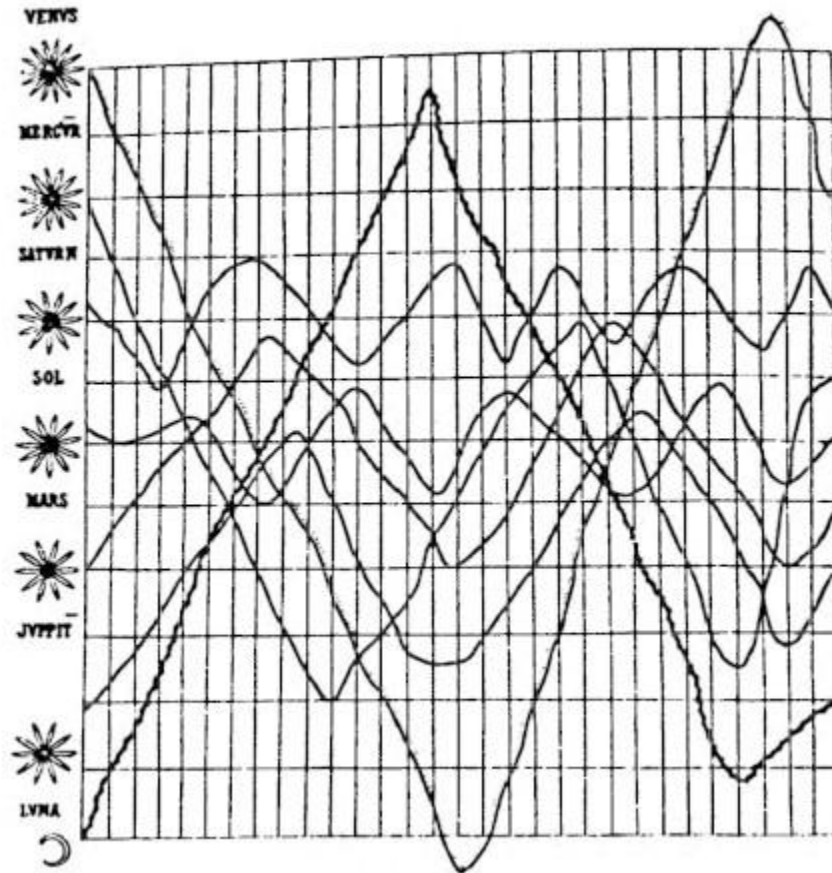
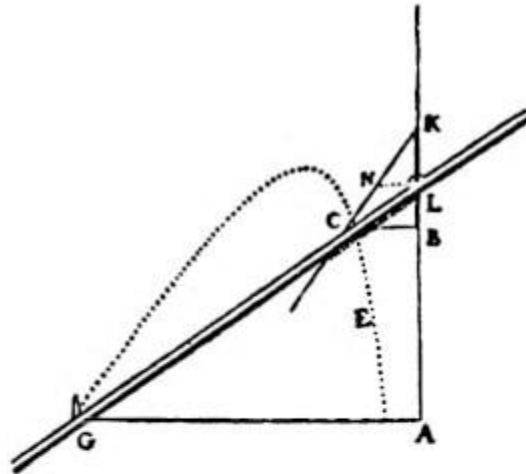


Lámina 2. La primera gráfica conocida: muestra los cambios de latitud (divisiones verticales) de los planetas respecto de la longitud (divisiones horizontales). Del MS Munich 14436 (siglo XI).



Après cela prenant vn point a discretion dans la courbe, comme C, sur lequel ie suppose que l'instrument qui sert a la descrire est appliqué, ie tire de ce point C la ligne CB parallele a GA, & pourceque CB & BA sont deux quantités indeterminées & inconnues, ie les nomme l'une y & l'autre x. mais affin de trouuer le rapport de l'une à l'autre; ie considere aussy les quantités connues qui determinent la description de cete ligne courbe, comme GA que ie nomme a, KL que ie nomme b, & NL parallele a GA que ie nomme c. puis ie dis, comme NL est à LK, ou c à b, ainsi CB, ou y, est à BK, qui est par consequent $\frac{b}{c}y$: & BL est $\frac{b}{c}y - b$, & AL est $x + \frac{b}{c}y - b$. de plus comme CB est à LB, ou y à $\frac{b}{c}y - b$, ainsi a, ou GA, est à LA, ou $x + \frac{b}{c}y - b$. de façon que multipliant

Lámina 3. Una página de *La Géométrie de Descartes* (1637), en la que estudia la ecuación algebraica de una parábola.



Lámina 4. Las disciplinas matemáticas y la filosofía. En la puerta exterior el estudiante encuentra a Euclides. Dentro ya del recinto halla a Tartaglia, rodeado de las disciplinas matemáticas: Aritmética, Geometría, Astronomía, Astrología, etc. El cañón acaba de disparar y muestra la trayectoria del proyectil. En la puerta del fondo se hallan Aristóteles y Platón, que darán la bienvenida al estudiante y le

conducirán ante la Filosofía. Platón sostiene en la mano una banda con la inscripción «No entre aquí nadie sin saber Geometría». (Cf. vol. I, p. 21.) De N. Tartaglia, Nova Sciencia, Venecia, 1537.

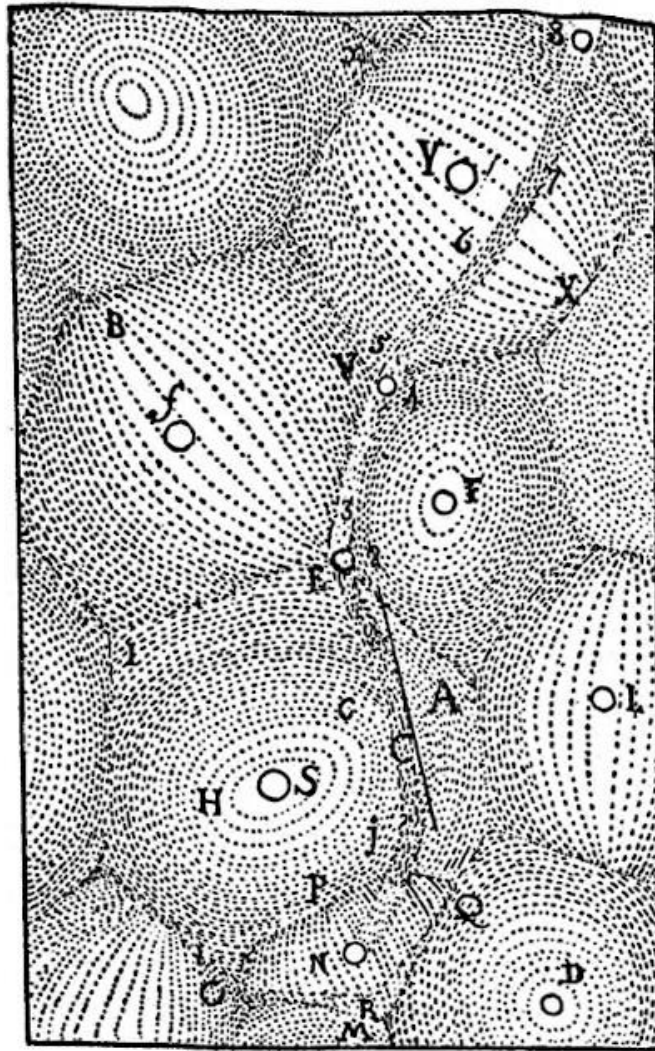


Lámina 5. Diagrama de vórtices, de los Principia Philosophiae de Descartes, Amsterdam, 1644. Los planetas giran alrededor del Sol S arrastrados por el remolino de materia sutil. Desde el ángulo superior derecho, en trayectoria irregular, descende un cometa que ha escapado de uno de los vórtices. Descartes pensaba que era imposible reducir el movimiento de los cometas a una ley.

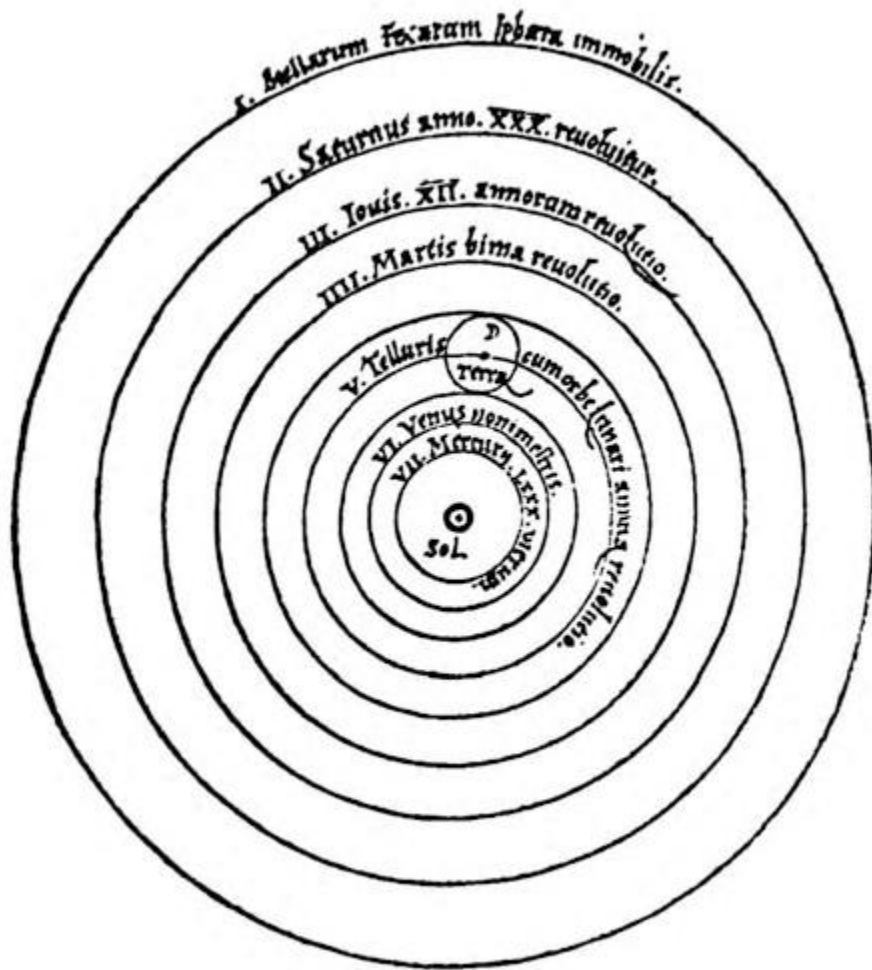


Lámina 6. El sistema de Copérnico, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, Nüremberg, 1543.

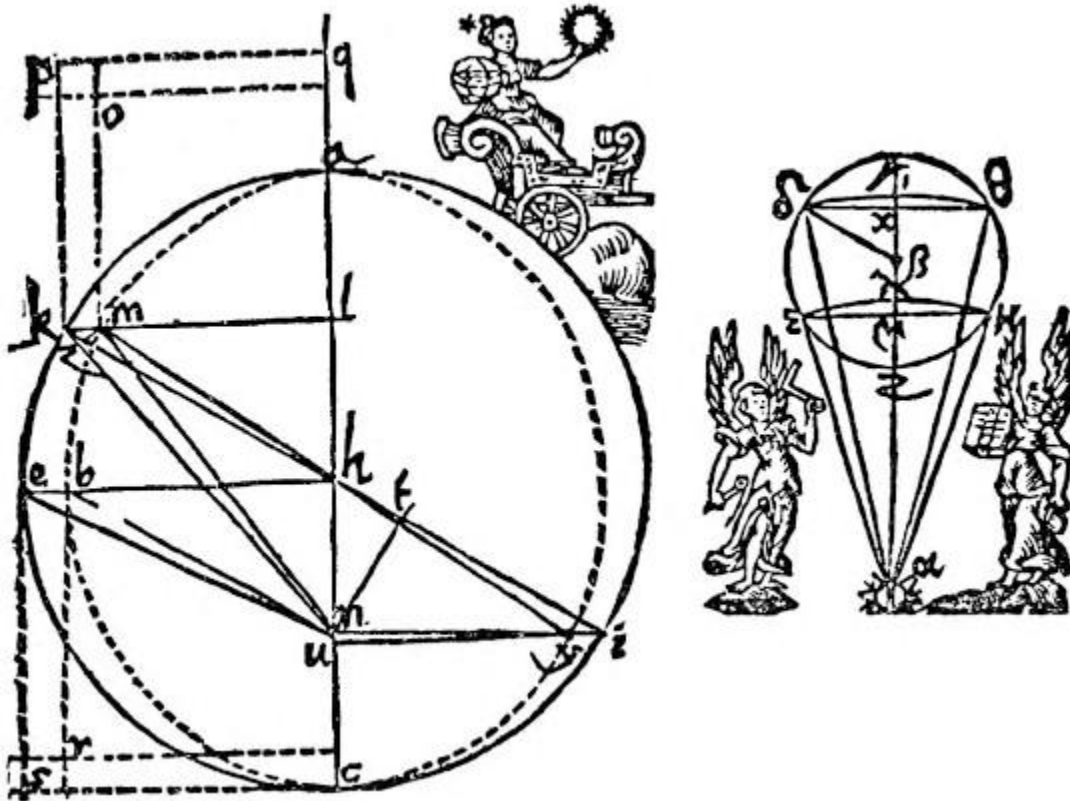


Lámina 7. La demostración de Kepler del carácter elíptico de la órbita de Marte. Si el Sol se halla en uno de los focos (n) de la elipse (la curva de trazo discontinuo) y el planeta en m , entonces —de acuerdo con la segunda ley de Kepler— el radio nm barre áreas iguales en tiempos iguales. El diagrama de la derecha forma parte de la demostración de Kepler de que los movimientos sobre una elipse y sobre una deferente y un epiciclo son equivalentes. De *Astronomía Novae*, Praga, 1609.

1610 My first observation of the new planets.
 octob. 17. 8. Syn
 5. 9. 5. P. A. L.
 12. 2. 2
 * 3' a 2'

1610 My first observation & others following
 of the new found planets about Jupiter.
 Syn.

1) octob. 17. 8. 40. 12. 1. 2
 I saw but one, & that above
 Jupiter, London. 0 3' a 2'

2) November 16. 9. 40. 9. 10.
 I saw one above J. & 10
 above. and found it J. & 10
 I saw an other very small
 between J. & 10. 5' or 4' a 2'.
 London 0 3' a 2'

3) November 17. 9. 40. 9.
 one under J. 0 4' or 5' a 2'

4) Syn. November 28. 8. 40. 7.
 one under J. 0 2' a 2'

5) November 30. 9. 40. 9.
 one above J. 0 10' or 12' a 2'

6) Decemb. 4. 8. 40. 9.
 one under J. 0 3' a 2' or 2'

7) Decemb. 7. 8. 40. 9.
 I saw but one above. 0 7' or 8' a 2'

8) Jan. 4. 17. 40. 17. Two from one
 the west 5. 30. - 6. 10. under.
 5. 4. lower also. Jan. 10. 17.
 The west J. 10. 17. The further
 out will be 10. 17. 10. 17.
 10. 17. 10. 17. 10. 17. 10. 17.

Lámina 8. Página de los papeles de Thomas Harriot en la Petworth House, describiendo sus observaciones sobre los satélites de Júpiter realizadas en Sycn House, junto al Támesis, cerca de Isleworth, y desde el tejado de una casa en Londres. Harriot conoció el descubrimiento de los satélites por Galileo el 7 de enero de 1610, pero ya en julio de 1609 había observado él la Luna con ayuda de un telescopio. La parte superior de la página es un apunte grosero de sus primeras observaciones; la inferior es el comienzo de una copia en limpio que hizo más tarde.



Lámina 9. Utilización del telescopio y otros instrumentos, y un aparato para mostrar las manchas solares por proyección sobre una pantalla. De Rosa Ursina de C. Scheiner, Bracciani, 1630.

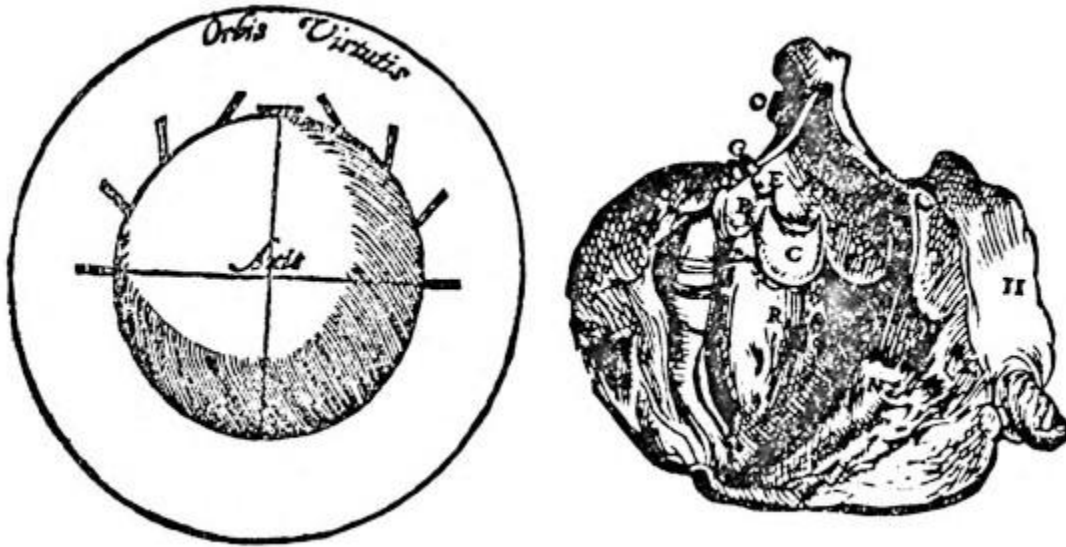


Lámina 10. Izquierda: La Tierra como un imán, e inclinación magnética. De De Magnete de Gilbert, Londres, 1600. Lámina 11. Derecha: El corazón y sus válvulas. Del De Humani Corporis Fabrica de Vesalio, Basilea, 1543.



Lámina 12. Dibujo de Leonardo del corazón y vasos sanguíneos asociados. De los Quaderni d'Anatomía, IV, Roya 1 Library, Windsor, MS; con permiso de Su Majestad la Reina.

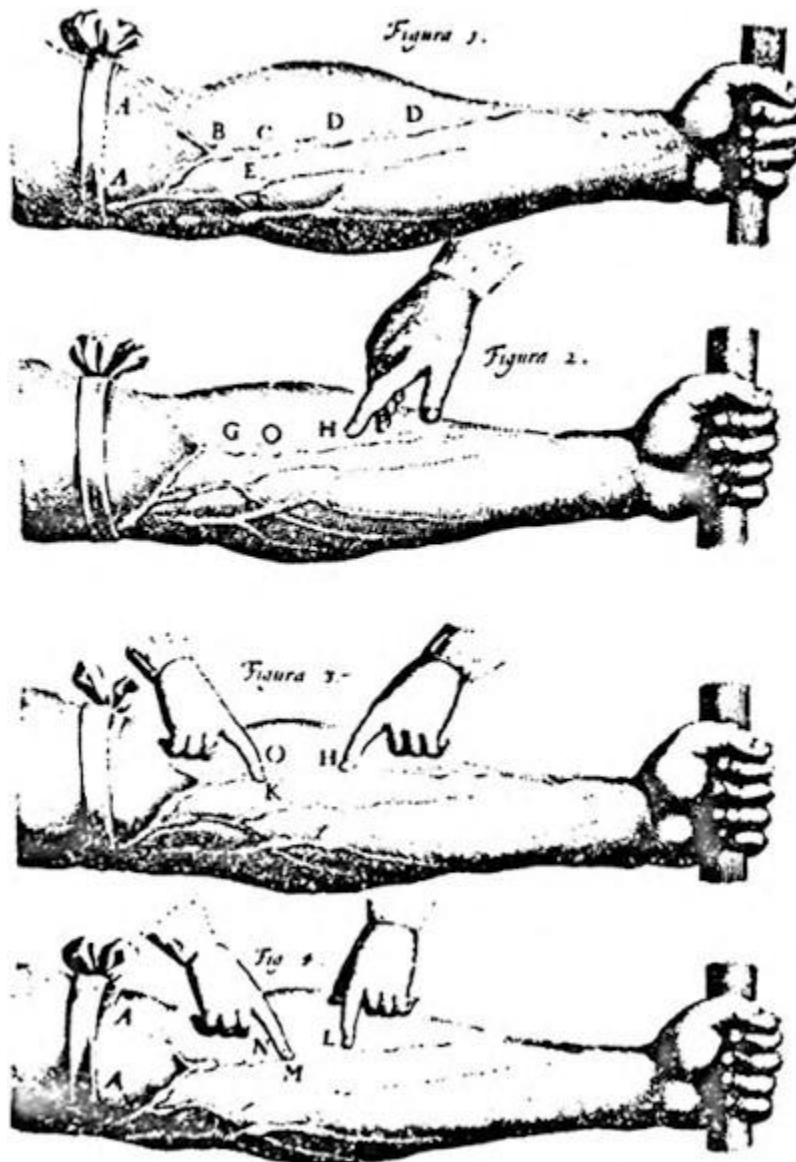


Lámina 13. Experimentos de Harvey mostrando la hinchazón de los nodulos de las válvulas venosas. De De Motu Cordis, Londres, 1639 (1ª ed. 1628)

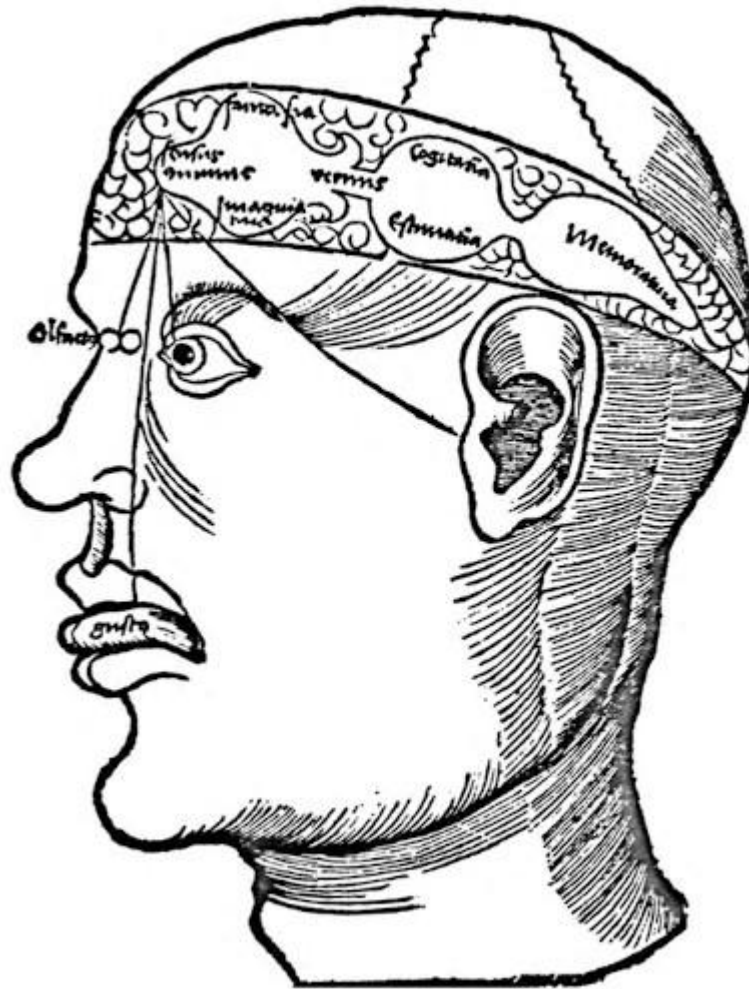


Lámina 14. *El sensus communis y las funciones localizadas en el cerebro. De la Margarita Philosophica de G. Reisch, Heidelberg, 1504.*

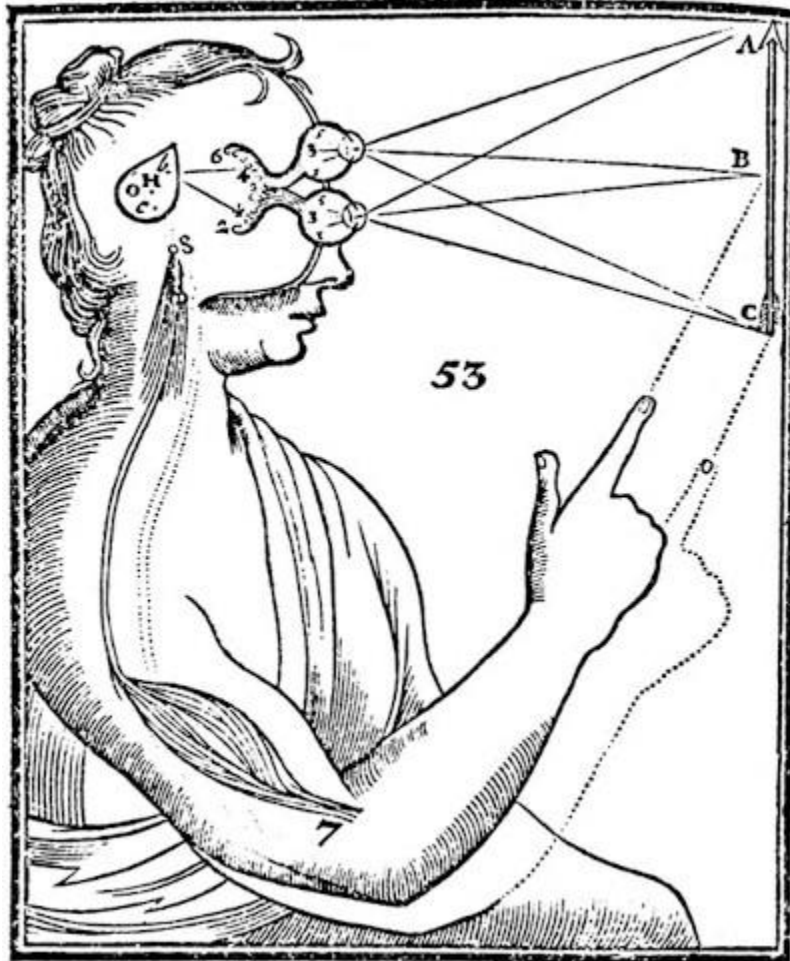


Lámina 15. Teoría de la percepción de Descartes, mostrando la transmisión del impulso nervioso desde el ojo a la glándula pineal y de allí a los músculos. Del De Homine, Amsterdam, 1677 (1ª ed., Leyden, 1662).

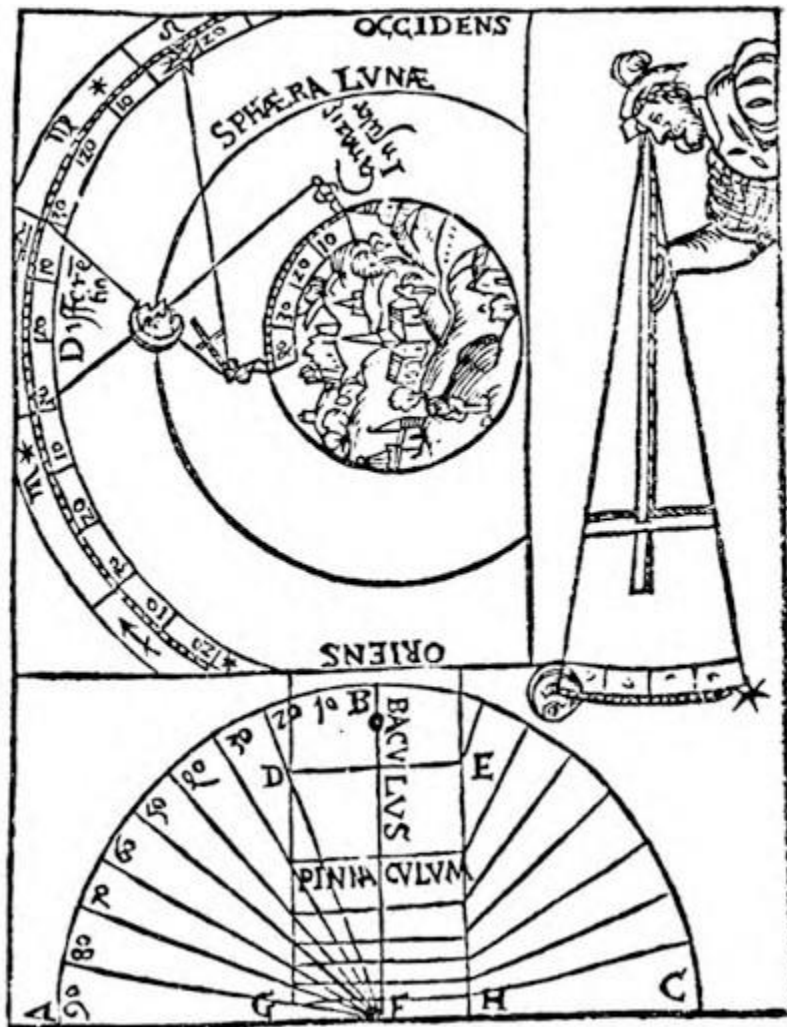


Lámina 16. Una ballestilla usada en topografía. De la de Petrus Apianus, Amberes, 1539.

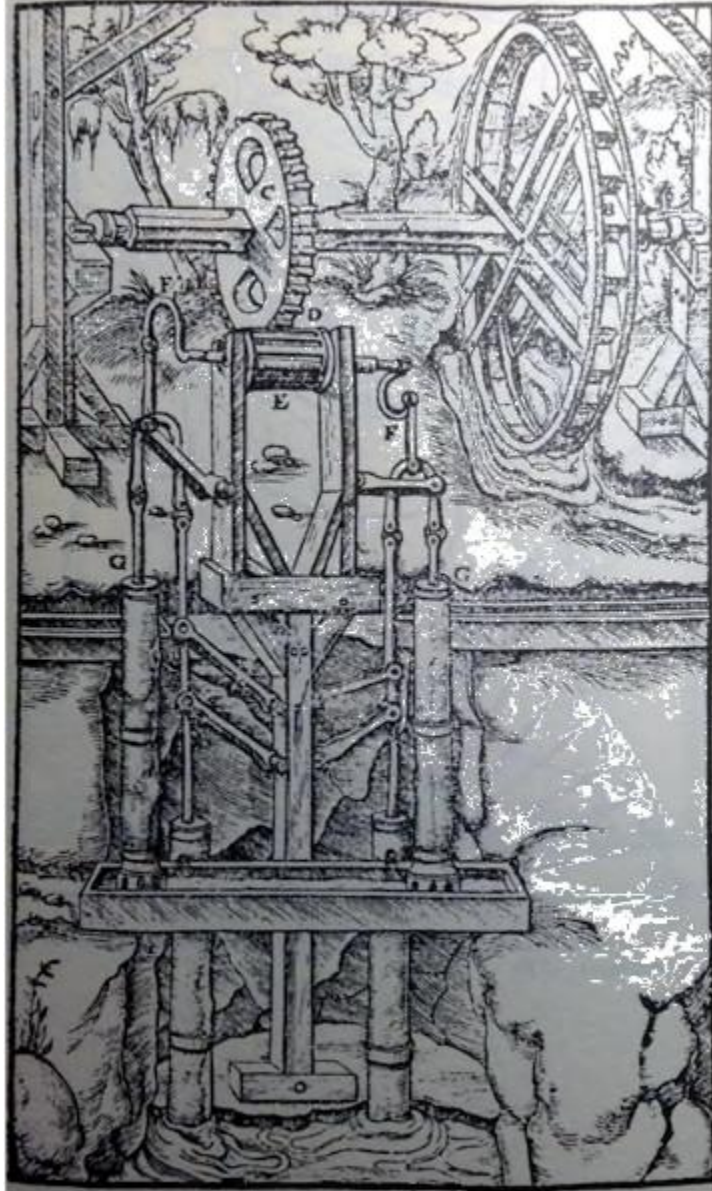


Lámina 17. Una bomba aspirante movida por agua, utilizada en una mina. Del De Re Metallica de Agrícola, Basilea, 1561 (1.a ed. 1556).

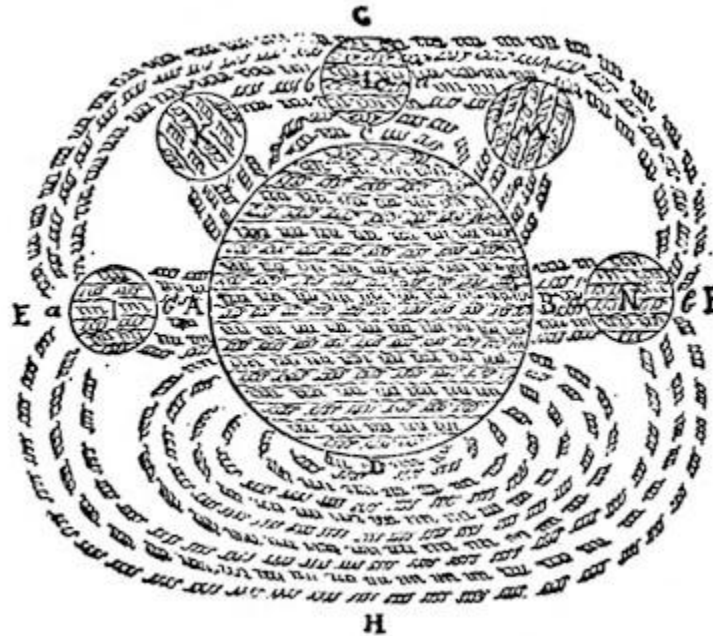


Lámina 18. Diagrama de los Principia Philosophiae de Descartes (1644), mostrando su explicación del magnetismo. Descartes atribuía el alineamiento que produce un imán en un trozo de hierro, o la tierra en la aguja de una brújula, a la existencia de partículas que, provistas de rosca, pasaban a través de la tierra o del hierro por pequeños conductos.



Lámina 19. Botánicos dibujando plantas. Del De Historia Stirpium de Fuchs, Basilea, 1542.



*Lámina 20. Dibujo de Leonardo de la sección de la cabeza y un ojo.
De los Quaderni d'Anatomia, V, Royal Library, Windsor MS; con
permiso de Su Majestad la Reina.*



Lámina 21. Una disección de los músculos. Del De Humani Corporis Fabrica de Vesalio (1543).

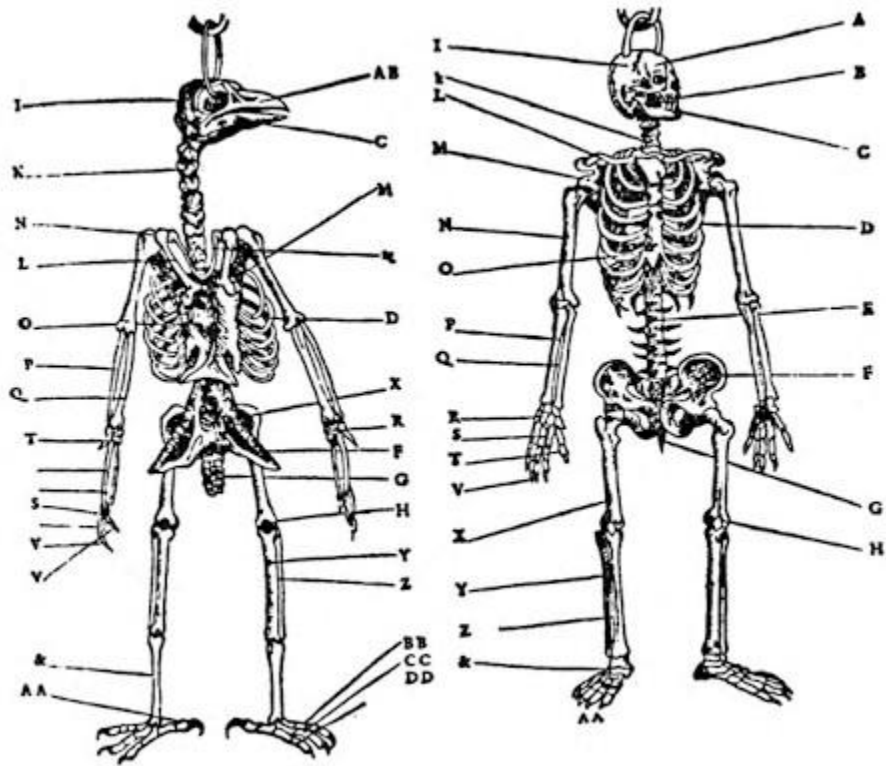


Lámina 22. Dibujos mostrando la comparación entre los esqueletos de un hombre y de un ave, de la Histoire de la nature des oyseaux de Belon, París, 1555.

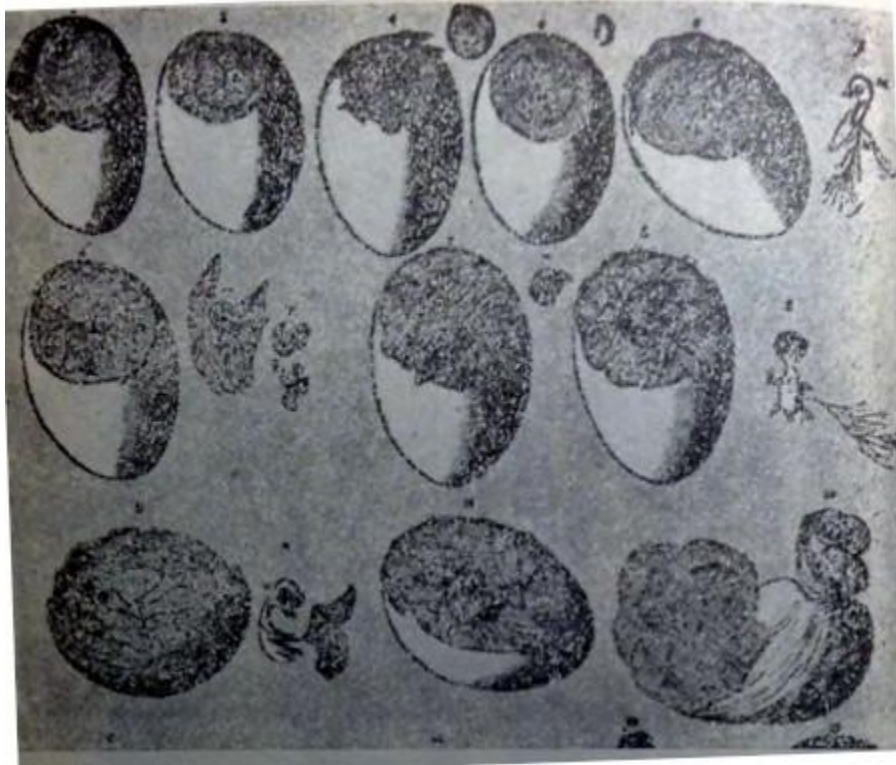


Lámina 23a. Embriología del pollo. Del De Formatione Ovi et Pulli de Fabrizio, Padua, 1621

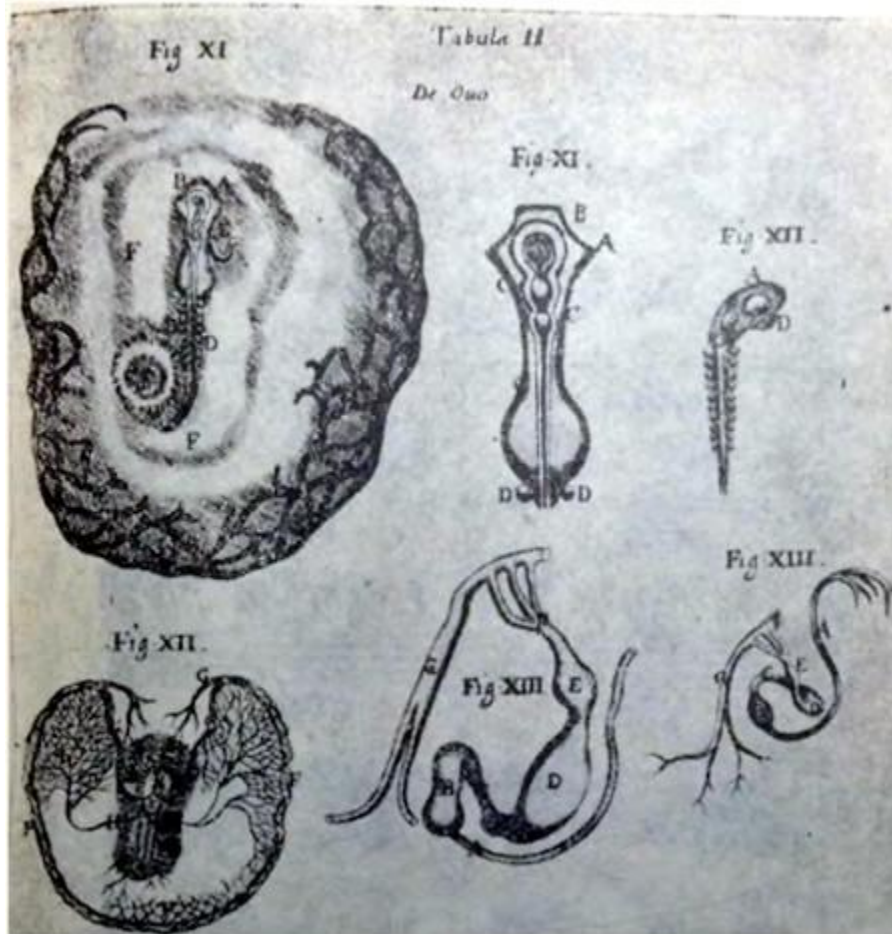


Lámina 23 b. Embriología del pollo, mostrando el uso del microscopio.
Del «De Formatione Pulli in Ovo» de Malpighi (1ª ed. 1673), en *Opera Omnia*, Londres, 1686.

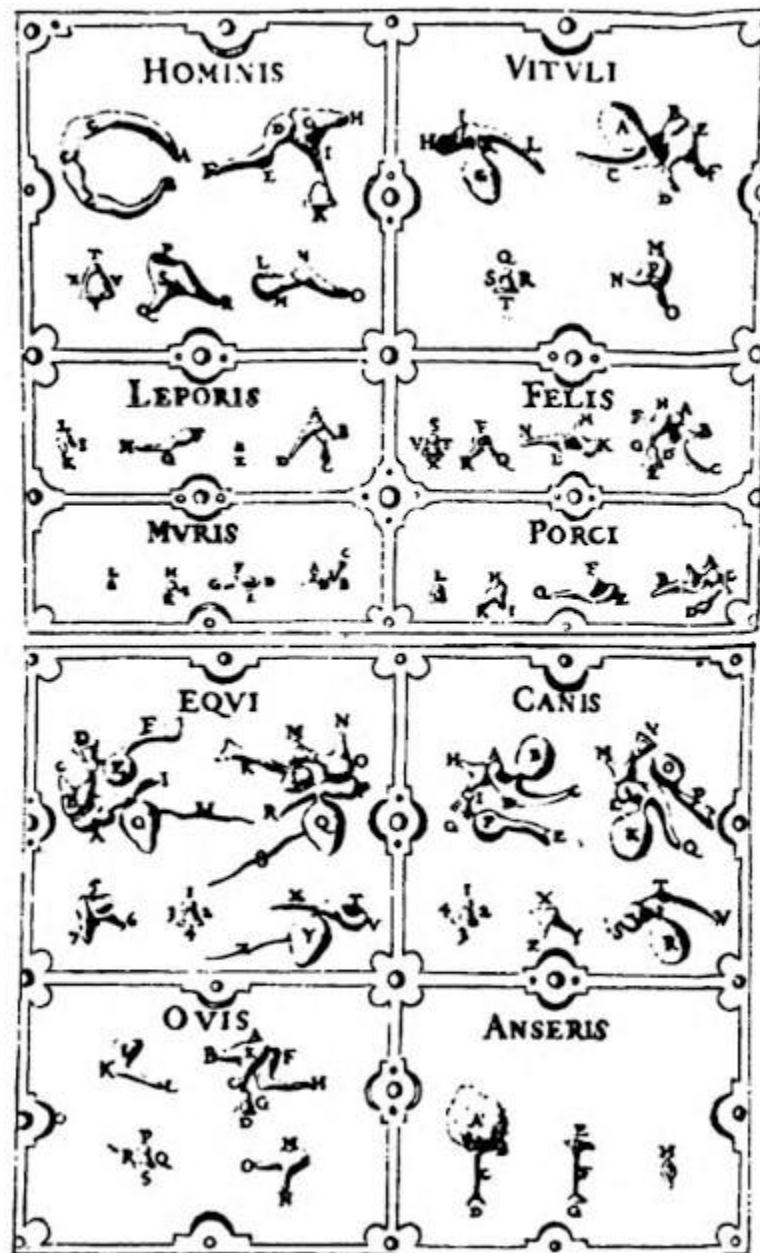


Lámina 24. La anatomía comparada de los huesecillos del oído, del *De Vocis Auditisque Organis* de Casserio, Ferrara, 1601.

Notas a las láminas

Lámina 8. La parte inferior de la página reza como sigue:

«Mi primera observación & otras subsiguientes de los planetas recién descubiertos alrededor de Júpiter.

1610 Syon.

17 de octubre Mercurio⁵¹. Hora 12^a, 1^a, 2^a. No vi más que uno & por encima.

Blackfriars, Londres.

16 de noviembre Venus *. Hora 9^a. Vi uno nítido 9' ó 10' por encima, y a veces creí ver otro muy pequeño entre ambos, 3' ó 4' á Júpiter*. Londres.

19 de noviembre. Luna *. Hora 9.*. Uno, por debajo, nítido.

Syon. 28 de noviembre Mercurio *. Hora 9^a, uno por debajo. Nítido.

30 de noviembre Venus *. Hora 9^a, uno por encima. Nítido.

4 de diciembre Mercurio *. Hora 9^a, uno por debajo. Nítido.

7 de diciembre. Hora 9^a. 9^a 1/2. No vi más que uno, & por encima.

Mane, hora 17^a. Dos, vistos en la parte occidental, un poco por debajo. Sir W. Lower también los vio aquí. El más cercano era el más nítido. El más alejado no se veía bien con el alcance de mi instrumento de 20/1 de 14' de diámetro.»

Lámina 22. «El corazón hace fluir la sangre reguladamente... Ello fue dispuesto así por la Naturaleza al objeto de que cuando el ventrículo derecho comience a cerrarse, la salida de sangre desde su amplio interior no cese de repente; pues una parte de esta sangre

ha de pasar al pulmón, y no pasaría sangre alguna si las válvulas impidiesen su salida. Pero el ventrículo se cierra una vez que el pulmón ha recibido su tasa de sangre, y que este ventrículo derecho puede ejercer presión, a través de los poros de la pared media, sobre el ventrículo izquierdo; y en este instante la aurícula derecha toma el exceso de sangre transvasándola al pulmón, el cual la devuelve en seguida al ventrículo derecho que se abre, restableciéndose su nivel gracias a la sangre que le llega del hígado. ¿Cuánta sangre puede darle el hígado mediante la apertura del corazón? Se suministra tanta sangre como consume; esto es, una cantidad mínima, ya que en el tiempo de una hora tienen lugar unas dos mil aperturas del corazón. Ello significa un gran peso transvasado... siete onzas en una hora.

Bibliografía

Capítulo 1

Filosofía y método científico en general

Vide Crombie, *Robert Grosseteste and the Origin of Experimental Science, 1100-1700*, 3.^a edic., revisada, Oxford, 1971; «Quantification in medieval physics», *Isis*, III (1961); «The relevance of the Middle Ages to the scientific movement», *Perspectives in Medieval History*, ed. por K. F. Drew y F. S. Lear, Chicago, 1963; L. Laudan, «Theories of scientific method from Plato to Mach: a bibliographical review», *History of Science*, VII (1968); J. H. Randall, jr., *The School of Padua and the Emergence of Modern Science*, Padua, 1961; cf. P. Duhem, «Essai sur la notion de théorie physique...», *Annaler de Philorophie Chrétienne*, VI (1908), y *La Théorie Physique*, París, 1914, vol. I, capítulos 1, 2 y 3 (Biología, Cosmología y Astronomía), e *infra* capítulo 2 (Matemática y Mecánica, Astronomía, Fisiología experimental, Concepciones de la Ciencia y Método).

Para el contexto filosófico están: N. Abbagnano, *Guglielmo di Ockham*, Lanciano, 1931; L. Baudry, «Les rapports de Guillaume d'Ockham et de Walter Burleigh», *Archives d'Histoire Doctrinale et Littéraire du Moyen Age*, IX (1934); *Le tractatus de principas theologiae attribué a G. d'Ockham (Eludes de Philos. Médiévale, XXIII)*, París, 1936; *Guillaume d'Ockham: ra vie res oeuvres, ses idées sociales et politiques (Elude de Philos. Médiévale, XXXIX)*,

París, 1949, I; P. Boehner, G. E. Mohán y A. C. Pegis, varios artículos sobre Guillermo Ockham en *Franciscan Studier*, N. S., I-IX (1941-1945); *Traditio*, I-IV (1943-1946); y *Speculum*, XXIII (1948); P. Boehner, *Medieval Logic, an outline of its development from 1230 to c. 1400*, Manchester, 1952; R. Cartón, *L'Expérience physique chez Roger Bacon (Etuder de Philos. Médiévale, II)*, París, 1924; W. C. Curry, *Chaucer and the Medieval Sciences*, Nueva York, 1924; Nicolás de Cusa, *Of Learned Ignorance*, trad. por F. G. Herón, Londres y New Haven, 1954; A. Edel, *Aristotle's Theory of the Infinite*, Nueva York, 1934; M. Patronnier de Gandillac, *La Philosophie de Nicolás de Cués*, París, 1941; N. W. Gilbert, *Renaissance Concepts of Methods*, Nueva York, 1960; E. Gilson, *The Unity of Philosophie Experience*, Londres, 1938; *Reason and Revelation in the Middle Ages*, Nueva York, 1938; R. Guelluy, *Philosophie et Théologie chez Guillaume d'Ockham*, Lovaina y París, 1947; W. C. Way, «Nicolaus Cusanus: The structure of his philosophy», *The Philosophical Review*, Nueva York, LXI; V. Heynck, «Ockham Literatur 1919-1949», *Franziskanische Studien*, XXXII (1950); W. y M. Kneale, *The Development of Logic*, Oxford, 1962; A. Koyré, «Les origines de la science moderne», *Diogéne*, núm. 16 (1936); G. de Lagerde, *La Naissance de l'esprit laïque au déclin du Moyen Age*, París, 1934-1946, 6 vols.; J. Lappe, *Nicolaus von Autrecourt: sein Leben, seine Philosophie, seine Schriften (Beitrage Ges. Philos. Mittelalt., VI, 2)*, 1908; E. Longpré, *La Philosophie du B. Duns Scotus*, París, 1926; R. McKeon, *Selections from Medieval Philosophers*, Nueva York, 1930, II; «Aristotle's conception of the

development and the nature of the scientific method», *J. Hist. of Ideas*, VIII (1947); A. Maier, «Zu einigen Problemen der Ockhamforschung», *Archivum Franciscanum Historicum*, Florencia, XLVI; A. Mansión, «L'induction chez Albert le Grand», *Revue Néo-scholastique*, XIII (1906); G. de Mattos, «L'intellect agent personnel dans les premiers écrits d'Albert le Grand et de Thomas d'Aquin», *ibid.*, XLIII; K. Michalski, «Les courants philosophiques à Oxford et à Paris pendant la XIV^e siècle», *Bulletin International de l'Académie Polonaise des Sciences et des Lettres (Cracovia)*, Clase dlist. et de philos., 1920; «Les sources du criticisme et du scepticisme dans la philosophie du XIV^e siècle», *ibid.*, 1925; P. Minges, *Joannis Duns Scoti Doctrina Philosophica et Theologica*, Berlín, 1930, 2 vols.; E. A. Moody, *The Logic of William Ockham*, Nueva York, 1935; *Truth and Consequence in Medieval Logic*, Amsterdam, 1953; Guillermo Ockham, «The *Centiloquium* attributed to...», ed. P. Boehner, *Franciscan Studies*, N. S. I (1941), II (1942); *Summa Logicae*, ed. P. Boehner (Franciscan Inst. Oubl., serie textos núm. 2), S. Buenaventura, N. Y., y Lovaina, 1951-1954, 2 vols.; *Philosophical Writings*, ed. P. Boehner, Edimburgo, 1957; J. R. O'Donnell, edición y estudio de Nicolás de Autrecourt en *Medieval Studies*, I (1939), IV (1942); C. V. Prantl, *Geschichte der Logik im Abendlande*, Leipzig, 1855-1870, 4 vols.; H. Rashdall, «Nicholas de Ultricuria, a medieval Hume», *Proc. Aristotelian Soc.*, N. S. VII (1907); H. Scholz y H. Schweitzer, *Die Sogennanten Definitionen durch Abstraktion (Forschungen zur Logistik und zur Grundlegung der exakten Wissenschaften)*, ed. H. Scholz, Heft III), Leipzig, 1935; L. Thorndike,

Science and Thought in the 15th Century, Nueva York, 1929; «Dates in intellectual history: the 14th century», *J. Hist. of Ideas*, VI (1945), Suppl. I; S. C. Tomay, *Ockham, Studies and Selections*, La Salle, 111., 1938; E. Vansteenberghe, *Le Cardinal Nicolás de Cués (1401-1464)*, París, 1920; J. R. Weinberg, *Nicolaus of Autrecourt*, Princeton, 1948.

Matemática:

Arquímedes, *Works*, ed. con notación moderna, capítulos introductorios por T. L. Heath, Cambridge, 1897; Nueva York, 1953 (en inglés); i *Les oeuvres complètes*, traducidas del griego al francés, con una introducción y notas, París y Bruselas, 1921; W. W. Rouse Ball, *A Short Account of the History of Mathematics*, 3.ª edic., Londres, 1901; G. Beaujouan, «L'enseignement de l'arithmétique élémentaire à l'université de Paris aux XIII^e et XIV^e siècles: de l'usage à l'algorithme», *Homage to Millás Vallicrosa*, Barcelona, 1956, I; O. Becker y J. E. Hofmann, *Geschichte der Mathematik*, Bonn, 1951; C. B. Boyer, *The Concepts of the Calculus*, Nueva York, 1939; *History of Analytic Geometry*, Nueva York, 1956 (reimpresión de artículos de *Scripta Mathematica*); L. Brunschwig, *Les Étapes de la philosophie mathématique*, 3.ª edic., París, 1929 —fundamental para el método matemático; F. Cajori, *A History of Mathematical Notations*, Londres, 1929, 2 vols.; M. Cantor, *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*, Leipzig, 1900, II; E. J. Dijksterhuis, *Archimedes*, Copenhagen, 1956 —muy útil; Euclides, *Elements*, traducción inglesa e introducción de Sir T. L. Heath, Cambridge,

1926, 3 vols. —excelente para el método geométrico; Sir T. L. Heath, *A History of Greek Mathematics*, 2 vols., Oxford, 1921; *Mathematics in Aristotle*, Oxford, 1949 —estudio excelente del método; G. F. Hill, *The Development of Arabio Numeráis in Europe*, Oxford, 1915; J. E. Hofmann, *History of Mathematics*, Nueva York, 1957 (trad. de *Geschichte der Mathematik*, Berlín, 1953, I); G. Libri, *Histoire des Sciences mathématiques en Italie*, París, 1838-1841, 4 vols.; Gino Loria, *Storia della matematica*, Turín, 1929-1933, 3 vols.; P. H. Michel, *De Pythagore á Euclide: Contribution á l'histoire des mathématiques pré-euclidiennes*, París, 1950; D. E. Smith, *History of Mathematics*, Nueva York, 1958; Dirk J. Strnik, *A Concise History of Mathematics*, Nueva York, 1948, 2 vols.; Suter, *op. cit.* en el vol. I, en el capítulo 3, Cosmología y Astronomía; P. Tannery, *Memoires scientifiques, V: Sciences exactes au moyen age*, publicadas por J. L. Heiberg, Toulouse y París, 1922; K. Vogel (ed.), *Die Practica des Algorismus Ratisbonensis*, Munich, 1954; H. Wieleitner, *Geschichte der Mathematik*, Berlín, 1939, 2 vols.; H. G. Zeuthen, *Histoire des mathématiques dans l'antiquité et le moyen. age*, París, 1902.

Física medieval tardía:

Los estudios básicos son: M. Qagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison, Wis., 1959; E. J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*, Oxford, 1961; P. Duhem, *Système du Monde y Etudes sur Léonard da Vinci*, París, 1906-1913, 3 series; Maier, *Zwei Grundprobleme der Scholastischen Naturphilosophie*, Roma, 1951 (2ª edic. del *Das Probleme der Intensiden*

Grosse..., 1939, y *Die Impetustheorie...*, 1940); *An der Grenzen von Scholastik und Naturwissenschaft*, Essen, 1943; *Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert*, Roma, 1949; *Metaphysische Hintergründe der spätscholastischen Naturphilosophie*, Roma, 1955; *Zwischen Philosophie und Mechanik*, Roma, 1958; *Ausgehendes Mittelalter*, 2 vols., Roma, 1964, 1967. También son útiles J. A. Weisheipl, *The Development of Physical Theory in Middle Ages*, Londres, 1959, y sus artículos sobre el plan de estudios de Artes en *Mediaeval Studies*, XXVI-XXVIII (1964-1966). Cf. también vol. I, en capítulo 3, Mecánica.

Materia, Espacio, Gravedad, Dinámica:

C. Bailey, *The Greek Atomists and Epicurus*, Oxford, 1928; E. Borchert, *Die Lehre von der Bewegung bei Nicolaus Oresme (Beitr. Ges. Philos. Mittelalt., XXXI, 3)*, 1934; Thomas de Bradwardino, *Tractatus de Proportionibus*, ed. con traducción inglesa e introducción por H. L. Crosby, jr., Madison, Wisc., 1955; J. Bulliot, «Jean Buridán et le mouvement de la terre, Question 22^a du Second Livre du 'De Caelo'», *Revue de Philosophie*, XXV (1914); Johannes Buridanus, *Quaestiones super Libri Quattuor de Caelo et Mundo*, ed. E. A. Moody, Cambridge, Mass., 1942; M. D. Chenu, «Aux origines de la Science moderne», *Revue des Sciences Philosophiques et Théologiques*, XXIX (1940); M. Qagett, *Giovanni Marliani and the late Medieval Physics (Columbia University Studies in History, Economics and Public Law, núm. 483)*, Nueva York, 1941; «The liber

de motu of Gerard of Brussels and the origins of kinematics in the West», *Osiris*, XII (1956), 73*175; Nicolaus von Cués, *Vom Globuspiel (De Ludo Globi)*, übersetzt und mit Einführung und Anmerkungen versehen von E. von Bredow (*Schriften des Nicolaus von Cués... in deutscher Übersetzung* herausgegeben von E. Hofmann, XIII), Hamburg, 1952; A. G. Drachmann, *Kteribior, Philon and Heron: a study in ancient pneumatics*, Copenhagen, 1948; P. Duhem, *Le mouvement absolu et le mouvement relatif*, reimpresión de *Revue de la Philosophie*, OCl-XIV (1907-1909); «Roger Bacon et l'horreur du vide», en *Roger Bacon Bssayr*, ed. Little, Oxford, 1914; D. B. Durand, «Nicole Oresme and the medieval origins of the modern Science», *Speculum*, XVI (1944); E. Fatal, «Jean Buridán: notes sur les manuscrits, les éditions et le contenu de ses ouvrages», *Archives d'Histoire Doctrinale et Littéraire du Moyen Age*, XV (1946); J. E. Hofmann, «Zum Gedanken an Thomas Bradwardine», *Centaurus*, I (1959); A. Koyré, «Le vide et l'espace infini au XIV^e siècle», *Archives d'Histoire Doctrinale et Littéraire du Moyen Age*, XXIV (1949); K. Lasswitz, *Geschichte der Atomistik vom Mittelalter bis Newton*, 2^a edic., Leipzig, 1926, 2 vols. —todavía la mejor historia del atomismo durante este período; A. Maier, «Die Anflage des physikalischen Denkens im 14. Jahrhundert», *Philosophia Naturalis*, I (1950); «Die Subjektivierung der Zeit in der scholastischen Philosophie», *ibid.*; «Die naturphilosophische Bedeutung der scholastischen Impetus-theorie», *Scholastik*, XXX (1955); C. Michalski, «La physique nouvelle et les différents courants philosophiques au XIV^e siècle», *Bulletin Internat. de l'Académie*

Polonaise des Sciences et des Lettres, Clase d'hist. et de philos., 1927; E. A. Moody, «Ockham, Buridán and Nicholas of Autrecourt», *Franciscan Studies*, N. S. VII (1947); «Ockham and Aegidius of Rome», *ibid.*, IX (1949); «Galileo and Avempace», *J. Hist. of Ideas*, XII (1951); S. Mosre, *Grundriss der Naturphilosophie bei Wilhelm von Ockham (Philosophie. und Grenzwissenschaften*, IV, 2-3), Innsbruck, 1932; Guillermo Ockham, *The Tractatus de Successivis*, ed. P. Boehner (Franciscan Inst. Publ., I), S. Buenaventura, N. Y., 1944; Nicolás Oresme, *Le lime du ciel et du monde*, ed. y trad. por A. D. Menut y A. J. Denomy, Madison, Wisc., 1968; O. Pederson, *Nicole Oresme og haur naturfilosofirke System*, Copenhagen, 1956; S. Pines, *Beitrag zur Islamischen Atomenlehre*, Berlín, 1936; «Les précurseurs musulmans de la théorie de l'irnpetus», *Archeion*, XXI (1938); «Études sur al-Zamán Abu'l Barakát al Bahdádí», *Revue des Etudes Juives*, CIII (1938); H. Shapiro, «Motion time and place according to William Ockham», *Franciscan Studies*, XVI (1956); Á. G. vañ Melsen, *From Atomos to Atom*, Pittsburgh, Pa., 1952; J. A. Weisheipl, «The concept of nature», *The New Scholasticism*, XXVIII (1954); «Nature and compulsory movement», *ibid.*, XXIX (1955); «Space and gravitation», *ibid.*

Física matemática:

Además de las obras ya mencionadas; T. B. Birch, «The theory of continuity of William of Ockham», *Philosophy of Science*, III U936); C. B. Boyer, «The invention of analytic geometry», *Scripta Mathematica*, XIX (1953); R. Caverni, *Storia del metodo sperimentale*

in Italia, 1891-1898, Florencia, 5 vols.; M. Clagett, «Richard Swineshead and the late medieval physics», *Osiris*, IX (1950); J. L. Coolidge, «Origins of analytic geometry», *Orim*, I (1936); C. Cusanus, *The Idiot in Four Books*, Londres, 1650; Nicolás de Cusa, *Idiota de Stalicy Experimentis*, ed. L. Baur (*Opera Omnia*, V), Leipzig, 1937; «De Stalicy Experimentis», trad. por Henry Viets, *Annals of Medical History*, IV (1922); S. Günther, «Die Anfänge und Entwicklungstadien des Koordinatenprinzips», *Abhandlungen der Naturhistorischen Gesellschaft zur Nürnberg*, VI (1877); E* Hofmann, «Das Universum des Nikolaus Cusanus», *Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften*; Philos.-hist. Klasse, 1929-1930, Heidelberg, 3 Abh.; H. P. Lattin, «The eleventh century MS Munich 14436; its contribution to the history of co-ordinates, of logic, of German studies in France», *Iris*, XXXVIII (1948); A. Maier, «Der Funktionsbegriff in der Physik des 14. Jahrhunderts», *Divus Thomas*, Friburgo, XIX (1946); «La doctrine de Nicolás d'Oresme sur les 'Configurations intensio* num*», *Revue des Sciences Philosophiques et Théologiques*, XXXII (1948); J. Uebinger, «Die philosophischen Schriften des Nikolaus Cusanus», *Zeitschrift für Philosophie und Philosophische Kritik*, CIII (1894), CV (1895), CVII (1896); H. Wieleitner, «Der 'Tractatus de latitudinibus formarum' des Oresme», *Bibliotheca Mathematica*, XIII (1913); «Über den Funktionsbegriff und die graphische Darstellung bei Oresme», *ibid.*, XIV (1914); Curtis Wilson, «Pomponazzi's criticism of Calculator», *Iris*, XLIV (1953); *William Heyterbury: medieval logic and the rise of mathematical physics*, Madison, Wisc., 1956.

La Ciencia y el renacimiento literario del siglo XV

Cf. Bolgar y Sandys, *op. cit.* en vol. I, capítulo 2; H. Barón, «Towards a more positive evaluation of the 15th century Renaissance», *J. Hist. of Ideas*, IV (1943); H. S. Bennett, *English Books and Readers, 1473-1537: being a study in the history of the book trade from Caxton to the incorporation of the Stationer's Company*, Londres, 1952; J. Burckardt, *The Civilization of the Renaissance in Italy*, Londres, 1937; E. Cassirer, P. O. Kristekler y J. A. Randall, jr., *The Renaissance Philosophy of Man*, Chicago, 1948; D. V. Durand, «Tradition and innovation in 15th century Italy», *J. Hist. of Ideas*, IV (1943); W. F. Ferguson, *The Renaissance in Historical Thought*, Cambridge, Mass., 1948 —un estudio historiográfico muy bien presentado, con una completa bibliografía; G. D. Hadzsits, *Lucretius and his Influence*, Londres, 1935; R. Johnson y S. V. Larkey, «Science», *Modern Language Quarterly*, II; R. F. Jones, *The Triumph of the English Language*, Stanford, 1953 —un estudio de las influencias culturales en el desarrollo de la lengua vernácula en el siglo XVI; Pearl Kibre, *The Ubrary of Pico della Mirandolla*, Nueva York, 1936; «Intellectual interests reflected in libraries of the 14th and 15th centuries», *J. Hist. of Ideas*, VII (1946); A. C. Klebs, «Incunabula sdentifica et medica», *Oririr*, IV (1937); P. O. Kristeller, *Studies in Renais* sanee Thought and Letters*, Roma, 1956 —muy importante; P. O. Kristeller y J. H. Randall, jr., «Study of Renaissance philosophy», *J. Hist. of Ideas*, II (1941); G. Sarton, «The scientific literature transmitted through the incuna* bula», *Osirir*, V

(1938); *The Appreciation of Ancient and Medieval Science during the Renaissance (1450-1600)*, Filadelfia, 1955; *Six Wings, Men of Science in the Renaissance*, Bloomington, Ind., 1957; Lynn Thomdike, «A high specialized medieval library», *Scriptorium*, VII (1935); H. Weisinger, «The idea of the Renaissance and the rise of modern Science», *Lychnos* (1946-1947); «English origins of the sociological interpretation of the Renaissance», *J. History of Ideas*, XI (1950); «English treatment of the relationship between the rise of science and the Renaissance. 1740-1840», *Annals of Science*, VII (1951); P. Winship, *Printing in the Fifteenth Century*, Filadelfia, 1940.

General:

Para una introducción existen: Marie Boas, *The Scientific Renaissance 1450-1630*, Londres, 1926; H. Butterfield, *The Origins of Modern Science*, Londres, 1949; C. C. Gillispie, *The Edge of Objectivity*, Princeton, 1960; A. R. Hall, *The Scientific Revolution 1500-1800*, Londres, 1954; *From Galileo to Newton 1630-1720*, Londres, 1963; y H. T. Pledge, *Science since 1500*, Londres, 1939. Mucha información valiosa está contenida en otros estudios anteriores de De Cavemi, Libri, Montuda y Whewell, y en A. Midi, *Panorama general de historia de la Ciencia*, Buenos Aires, 1945-1950, 4 vols.; L. Thomdike, *History of Magic and Experimental Science*, Nueva York, 1941-1959, vols. V-VIII; W. P. D. Wightman, *Science and the Renaissance*, Aberdeen, 1962, 2 vols.; y A. Wolf, *A History of Science, Technology and Philosophy in 16th and 17th centuries*, revisada por D. McKie, Londres, 1951; cf. también Henry

Crew, *The Rise of Modern Physics*, 2.^a edic., Baltimore, 1935. Colecciones útiles de fuente y de información varía, algunas veces inexactas, son: R. T. Gunther, *Early Science in Oxford*, 14 vols., Oxford, 1923-1945, y *Early Science in Cambridge*, Oxford, 1937. Son útiles para antologías en traducción inglesa los Source Books publicados por la Universidad de Harvard: de *Astronomía*, ed. H. Shapley y H. E. Howarth, 1929; *Matemáticas*, ed. D. E. Smith, 1929; *Física*, ed. W. F. Magie, 1935; *Geología*, ed. K. F. Mather, 1939; *Biología animal*, ed. T. S. Hall, 1951; *Química*, ed. H. M. Leicester y H. S. Klickstein, 1952; y *Psicología*, ed. R. J. Hermstein y E. G. Boring, 1966.

El pensamiento científico en una nueva situación social

P. Alien, «Scientific studies in the English universities of the seventeenth century», / *Hist. of Ideas*, X (1949); J. Bertrand, *UAcadémie des Sciences et les académiciens de 1666 a 1793*, París, 1869; T. Birch, *History of the Royal Society*, Londres, 1756, 4 vols.; H. Brown, *Scientific Organization in Seventeenth Century Trance (1620-1680)*, Baltimore, 1934; «The utilitarian motive in the age of Descartes», *Annals of Science* (1936); F. Brunot, *Histoire de la Langue Française*, París, 1930, VI; I, *Le mouvement des idées et les vocabulaires techniques* (fase. 2, «La langue des Sciences»); J. N. D. Bush, *English Literature in the Earlier Seventeenth Century, 1600-1660*, Oxford, 1945; G. N. Clarke, *Science and Social Welfare in the Age of Newton*, Oxford, 1937; *The Seventeenth Century*, Oxford, 1947; *Early Modern Europe from about 1450 to about 1720*, Londres,

1957 —uno de los esbozos más iluminadores; A. C. Crombie, *Oxford's Contribution to the Origins of Modern Science*, Oxford, 1954; F. de Dainville, «L'enseignement des mathématiques dans les Colléges Jésuites de France du XVI^e au XVII^e siècle», *Revue d'Histoire des Sciences*, VII (1954); A. Favaro, «Documenti per la storia dell'Accademia dei Lincei», *Buletino di Bibliografia e di Storia delle Scienze*, XX (Roma, 1887); L. P. V. Febvre, *Le probleme de Vincroyance au XVI^e siècle*, París, 1947; A. J. George, «The Génesis of the Académie des Sciences», *Annals of Science*, III (1938); H. Grossmann, «Die gesellschaftlichen Grundlagen der mechanistischen Philosophie und die manufaktur», *Zeitschrift zür Sozitiforschungen*, IV (1935); H. Hartley (ed.), *The Royal Society: its origins and founders*, Londres, 1960; H. Hauser, «Science et philosophie après le Concile de Trente», *Scientia*, LVII (1935); Paul Hazard, *La crise de la conscience européenne (1680-1715)*, París, 1935 (traducción inglesa, Londres, 1953); R. Hooykaas, «Science and Reformation», *Cahiers d'Histoire Mondiale*, III (1956); *Humanisme, science et Réforme, Fierre de la Ramée (1515-1572)*, Leyden, 1958; W. E. Houghton, «The history of trades», *J. Hist. of Ideas*, II ; «The English virtuoso in the seventeenth century», *ibid.*, III (1942); J. Jacquot, «Thomas Harriot's reputation for impiety», *Notes and Records of the Royal Society*, IX (1952); F. R. Johnson, «Gresham College: precursor of the Royal Society», *J. Hist. of Ideas*, I (1940); R. F. Jones, *Ancients and Moderns*, 2.^a edic., S. Luis, 1961; J. E. King, *Science and Rationalism in the Government of Louis XIV, 1661-1683*, Baltimore, 1949; P. H. Kocher, *Science and Religion in Elizabethan*

England, San Marino, Cal., 1953; S. F. Masón, «The Scientific Revolution and the Protestant Reformation», *Annals of Science*, IX (1953); R. K. Merton, «Science, technology and society in 17th century England», *Osiris*, IV (1938); J. V. Nef, *Industry and Government in France and England, 1540-1640*, Filadelfia, 1940; L. S. Olschki, *Geschichte der neusprachlichen toirsenrchaftlicfien Literatur*, Heidelberg, 1919-1927, 3 vols.; M. Ornstein (Bronfenbrenner), *The Role of scientific Societies in the Seventeenth Century*, Chicago, 1938 —una visión de conjunto estupenda; L. Pastor, *The History of the Popes*, trad. E. Graf, Londres, 1937, 1938, XXV, XXIX; P. Smith, *A History of Modern Culture*, Londres, 1930-1934, 2 vols.; T. Sprat, *A History of the Royal Society of London*, Londres, 1667; R. H. Syfret, «The origins of the Royal Society», *Notes and Records of the Royal Society*, V (1948); «Some early reactions to the Royal Society», *ibid.*, VII (1950); H. O. Taylor, *Thought and Expression in the Sixteenth Century*, Nueva York, 2 vols.; G. H. Turnbull, «Samuel Hartlib's influence on the early history of the Royal Society», *Notes and Records of the Royal Society*, X (1953); J. L. Vives, *On Education*, trad. por F. Watson, Cambridge, 1913; A. von Martin, *Sociology of the Renaissance*, Londres, 1945; C. R. Weld, *A History of the Royal Society*, Londres, 1848, 2 vols.; B. Willey, *The Seventeenth Century Background*, Londres, 1934; Louis B. Wright, *MiddleClass Culture in Elizabethan England*, Chapel Hill, N. C., 1935; E. Zilsel, «Problems of empiricism: experiment and manual labour», *International Encyclopedia of Unified Science*, ed. O. Neurath, 1941, II, VIII; «The sociological roots of science», *American*

J. of Sociology, XLVII (1942); «The génesis of the concept of physical laws», *The Philosophical Review*, LI; «The génesis of the concept of scientific progress», *J. Hist. of Ideas*, VI (1945).

Matemática y Mecánica

Una visión de conjunto excelente es la de R. Dugas, *La Mécanique au XVII^e siecle*, Neuchâtel, 1954. Además de las obras mencionadas en el capítulo 1 y en el volumen I, capítulo 3, existen: A. Artimage, «The deviation of fallfng bodies», *Annals of Science*, V (1948); Isaac Beeckman (1588-1637), *Journal*, ed. Cornelius de Waard, La Haya, 1953; A. E. Bell, *Chrirtian Huygens and the developrment of Science in the Seventeenth Century*, Londres, 1947; S. Brodetsky, *Sir Isaac Newton*, Londres, 1927 —un resumen útil; L. Brunschwig, *Les çtapes de la philosophie mathématique*, París, 1947; E. A. Burt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, Londres, 1932 (reimpresión en Nueva York, 1955); F. Cajori, *A History of Mathematics*, Nueva York, 1924; *A History of Physics*, 2.^a edic., Nueva York, 1929; A. Carli y A. Favaro, *Bibliografía galileiana (15681895)*, Roma, 1896; E. Cassirer, «Mathematische Mystik und matematische Naturwissenschaft», *Lychnos* (1940); «Galileo's Platonism», en *Studies and Essays... offered... to George Sarton*, ed. M. F. Ashley Montague, NuevaYork, 1944; I. B. Cohén, «Galileo's rejection of the possibility of velodty changing uniformaly with respect to distance», *Iris*, XLVII (1956); Julián L. Coolidge, *History of Geometrical Methods*, Oxford, 1940; Lañe Cooper, *Arislotle, Galileo and the Tower of Pisa*, Ithaca, N. Y., 1935; R. Depau, *Simón Stevin*,

Bruselas, 1942 (estudio y trad. francesa de los textos); René Descartes, *Oeuvres*, ed. Ch. Adam y P. Tannery, París, 1897-1913, 12 vols. (trad. inglesa obras filosóficas por E. S. Haldane y G. R. T. Ross, 2ª edic., Cambridge, 1931; Nueva York, 1955); de *The Geometry*, por D. E. Smith y M. L. Latham, La Salle. 111., 1925; Nueva York, 1954); E. J. Dijksterhuis, *De Mechanisering van het Wereldbeeld*, Amsterdam, 1950 (trad. inglesa, Oxford, 1961); F. Enriques, *Le Matematiche tiella storia e nella cultura*, Bolonia, 1938; *Gdilee. Aspects de sa vie et de son oeuvre*, París, 1968; Galileo Galilei, *Opere*, ed. naz. por A. Faváro, Florencia, 1890-1909, 20 vols. (trad. inglesa de *De Motu* por I. E. Drabkin, Madison, Wisc., 1960); *The Sidereal Messenger*. por E. S. Carlos, Londres, 1880; *Dialogue concerning the Two Principal Systems of the World*, por T. Salisbury, 1661, revisada por G. de Santillans, Chicago, 1953, y por S. Drake, Berkeley, Cal., 1953; *Mathematical Discourses... (Dialogues) Concerning Two New Sciences*, por H. Crew y A. de Salvio, Nueva York, 1914, 1952; *Discoveries and Opinions of Galileo*, trad., con una introducción y notas de S. Drake, Nueva York, 1957 [*Starry Messenger, Letters on Sunspots, Il Saggiatore, Letter to the Grand Duchers Cbristina*]; L. Geymonat, *Galileo Galilei*, trad. inglesa por Drake, Nueva York, 1965; A. R. Hall, *Ballistics in the Seventeenth Century*, Cambridge, 1952; L. R. Heath, *The Concept of Time*, Chicago, 1936; Christian Huygens, *Oeuvres complètes*, ed. Saâété Hollandaise des Saences, La Haya, 1888-1950, 22 vols. (trad. inglesa del *Treaúse on Light*, por S. P. Thompson, Chicago, 1945); A. Koyré, *Étuder galiléennes (Actudités Scientifiquer et Indurtrieller,*

núms. 852-854), París, 1939 —muy importante; «Galileo and Plato», /. *Hist. of Ideas*, IV (1943); «The significance of the Newtonian Synthesis», *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, XXIX (1950); «An experiment in measurement», *Proceedings of the American Philosophical Society*, XCVII (1953); «A documentary history of the problem of fall from Kepler to Newton», *Transactions of the American Philosophical Society*, N. S. XLV, 4 (1955); «Pour une édition critique des oeuvres de Newton», *Revue d'Histoire des Sciences*, VIII (1955); «L'hypothese et l'expérience chez Newton», *Bulletin de la Société Française de Philosophie*, I (1956); R. Lammell, *Galileo Galilei und sein Zeitalter*, Zurich, 1942 —un estudio excelente; R. Lenoble, *Marin Mersenne ou la naissance du mécanisme*, París, 1943; *Leonardo da Vinci et l'expérience identifiante au XVI^e siècle* (Colloques internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique), París, 1953; W. H. Macaulay, «Newton's theory of kinetics», *Bulletin of the American Mathematical Society*, III (1897); E. Mach, *The Science of Mechanics*, trad. por T. J. McCormack, La Salle, Ill., 1942; E. McMullin (ed.), *Galileo: Man of Science*, Nueva York, 1967; R. Marcolongo, «Lo sviluppo della meccanica sino ai discepoli di Galileo», *Atti della Reale Accademia dei Lincei*, XIII (1920); M. Mersenne, *Correspondance*, ed. Mme. Paul Tannery, Cornelis de Waard y Leñé Pintard, París, 1932, I; G. Milhaud, *Descartes savant*, París, 1921; A. Mieli, «Il tricentenario del 'Discorsi e dimostrazione matematiche' di Galileo Galilei», *Archeion*, XXI (1938) —una crítica de Duhem, etc.; P. Mouy, *Le Développement de la physique carésienne, 1646-1712*, París, 1934; Sir Isaac

Newton, *Mathematical Prináples of Natural Philosophy and bis System of the World*, trad. de Motte, revisada por F. Cajori, Berkeley, Cal., 1946; F. Rosen-burger, *Isaac Newton und seine Phyrikalischen Prinzipien*, Leipzig, 1895; O. Ore, *Cardano: The Gambling Scholar*, Princeton, 1953; G. Sarton, «Simón Stevin of Brughes», *Iris*, XXI (1934); J. F. Scott, *The Scientific Work of René Descartes*, Londres, 1952; W. B. Parsons, *Engineers and Engirieering in the Renaissance*, Baltimore, 1939; D. E. Smith, *A History of Mathematics*, Boston, 1923-1925, 2 vols.; Simón Stevin, *The Principal Works*, ed. E. J. Dijksterhuis; vol. I, «Mechanics», Amsterdam, 1955; E. W. Strong, *Procedures and Metaphysics*, Berkely, 1936; H. J. Webb, «The science of gunnery in Elizabethan England», *Irir_f* XLV (1954); P. P. Wiener, «The tradition behind Galileo's methodology», *Orris*, I (1936).

Astronomía

Además de las obras mencionadas en la sección anterior y en el volumen I, capítulo 3; G. Abetti, *The History of Astronomy*, trad. de la italiana *Storia dell'Astronomía* por. Betty Burr Abetti, Nueva York, 1952; E. J. Aitón, «Galileo's theory of the tides», *Annals of Science*, X (1954); D. C. Alien, *The Star-crossed Renaissance*, Durham, N. C., 1941 —sobre Astrología; A. Armitage, *Copernicus*, Londres, 1938; «The cosmology of Giordano Bruñe», *Annals of Science*, VI (1948); «'Borrell's hypothesis' and the rise of celestial mechanics», *ibid.*; C. Baumgardt, *Johannes Kepler: Life and Letters*, Nueva York, 1952; A. Berry, *Short History of Astronomy*, Londres, 1896; G. Bigourdan,

VAstronomie, évolution des idéer et des méthodes, París, 1911; I. Bouilliau, *Astronomía Philolaica*, París, 1645; B. Boyer, «Notes on epicycles and the ellipse from Copernicus to Lahire», *Iris*, XXXVIII (1947); J. Brodrick, *The Ufe and Work of Blesseá Robert, Cardinal Bellarmino 1542-1621*, Londres, 1928; W. W. Bryant, *Kepler*, Nueva York, 1920; Tommaso Campanella, «The defence of Galileo of Thomas Campanellá», trad. y ed. por C. McColley, *Smith College of Studies in History*, Northampton, Mass., XX (1950); Max Caspar, *Johannes Kepler*, 2* edic., Stuttgart, 1950 (trad. C. D. Hellman, Nueva York, 1959); Copernicus, *De Revolutionibus...* (trad. Wallis, en *Great Books of the Western World*, Chicago, 1952 —algo inexacto; trad. del prefacio y libro I por J. F. Dobson y S. Brodsky, *Royal Astronomical Society Occasional Notes*, II, 1947; núm. 10); A. C. Crombie, *Galilée devaní les critiques de la porteriíé* (Les Conférences au Palais de la Découverte, Série D, núm. 45), París, 1957; H. Dingle, ensayos en *The Scientific Adventure*, Londres, 1952; J. L. E. Dreyer, *Tycho Brahe*, Edimburgo, 1890; *History of the Planetary Systems*, Cambridge, 1906 (reimpreso como *A History of Astronomy...*, Nueva York, 1953); A. Favaro, *Galileo Galilei e Vnquirizione. Documenti del processo Galileiano...*, Florencia, 1907; J. A. Gade, *The Life and Times of Tycho Brahe*, Princeton, 1947; K. von Gleber, *Galileo Galilei and the Román Curia*, trad. Mrs. G. Sturge, Londres, 1879; B. Gisnburg, «The scientific valué of the Copemican induction», *Oriris*, I (1936); E. Goldbeck, *Keplers Leher von der Gravitation*, Halle a/d. Saale, 1896; S. Greenberg, *The Infinite in Giordano Bruno*, con una traducción de su diálogo

Concerning The Cause Principie and One, Nueva York, 1950; W. Hartner, «The Mercury horoscope of Marco Antonio Michiel of Venice, a study in the history of Renaissance astrology and astronomy», en *Vistas in Astronomy*, ed. A. Beer, Londres y Nueva York, 1955, I; C. D. Hellman, *The Cornet of 1577: its place in the History of Astronomy*, Nueva York, 1944; G. Holton, «Johannes Kepler's universe: its physics and metaphysics», *American Journal of Physics*, XXIV (1956); Mas Jammer, *Concepts of Space: the History of Theories of Space in Physics*, Cambridge, Mass., 1954; *Concepts of Forcé*, Cambridge, Mass., 1957; F. R. Johnson, «The influence of Thomas Digges on the progress of modern astronomy in sixteenth century England», *Osiris*, I (1936); *As trono, mical Thought in Renaissance England*, Baltimore, 1937; «Astronomical texts books in sixteenth century», en *Science, Medicine and History*, ed. E. A. Underwood, Oxford, 1953, I; F. R. Johnson y S. V. Larkey, «Thomas Digges, the Copemican System, and the idea of the infinity of universe in 1576», *Huntington Library Bulletin*, San Marino, Cal., V (1934); «Robert Recorde's mathematical teaching and the anti-Aristotelian movement», *ibid.*, VII (1935); G. Jung y W. Pauli, *The Interpretation of Nature and the Psyche*, Londres, 1955 (ed. alemana, Zurich, 1952) —Pauli tiene un ensayo interesante sobre Kepler; *Jobarn Kepler, 1571-1630. A Tercentenary Commemoration of bis Life and Work*, Baltimore, 1931 —con bibliografía; Johannes Kepler, *Gesarmmelte Werke*, ed. W. von Dyckt y M. Caspar, Munich, 1938; A. Koyré, *Philosophical Review*, III (1943) —sobre el concepto de inercia de Kepler; *La Révolution astronomique: Copernic, Kepler,*

Borelli, París 1961 —esencial, «La gravitation universelle de Kepler á Newton», *Actes du VI Congrès International d'Histoire des Sciences, Amsterdam, 1950*, París, 1953; «L'oeuvre astronomique de Kepler», *XVII^e Siecle*, París, núm. 30 (1956); T. S. Kuhn, *The Copernican Revolution*, Cambridge, Mass., 1957 —muy útil; G. McColley, «The 17th century doctrine of a plurality of worlds», *Annals of Science*, I (1936); A. Mercati, *II Sommario del processo di Giordano Bruno (Studi e Testi*, CI), Roma, 1942; H. Metzger, *Attraction universelle et religion naturelle chez quelque commentateur anglais de Newton*, París, 1938; S. I. Mintz, «Galileo, Hobbes, and the árele of perfection», *Iris*, XLIII (1952); M. H. Nicholson, *The Breaking of the Circle. Studies on the effect of 'New Science' upon seventeenth century poetry*, Evanston, Ill., 1950; W. Norlind, «Copernicus and Luther: a critical study», *Iris*, XLIV (1953); E. Panofsky, *Galileo as a Critic of Arts*, La Haya, 1954 —sobre Galileo y Kepler; Pastor, *History of the Popes*, Londres, 1937, 1938, XXV, XXIX; S. P. Rigaud, *Supplement to Dr. Bradley's Miscellaneous Works, with an Account os Harriot's astronomical papers*, Oxford, 1833; E. Rossen, *Three Copernican Traetises*, 2.^a edic., Nueva York, 1959; «The Ramus-Rheticus Correspondence», *J. Hist. of Ideas*, I (1940); «Maurolico's attitude toward Copernicus», *Proceedings of the American Philosophical Society*, CI (1957); *Kepler's Conversation with Galileo's Sidereal Messenger*, Nueva York, 1965; G. de Santillana, *The Crime of Galileo*, Chicago, 1955 (*Le procès de Galilée*, París, 1956) —el estudio más reciente del asunto Galileo y la Iglesia Católica; D. Shapeley, «Pre-Huygenian observations of Satum's rings», *Isis*, XL

(1949); D. W. Singer, *Giordano Bruno: his Ufe and Thought*, Nueva York-Londres, 1950; A. J. Snow, *Matter and Gravity in Newton's Physical Philosophy*, Londres, 1926; Stimpson, *The Gradual Acceptance of the Copernican Theory*, Nueva York, 1917; James Winny (ed.), *The Frarne of Order: an outline of Elizabethan beliefs taken from treatiser of the late sixteenth century*, Londres, 1957; E. Wohlwill, *Galilei und reine Kampf für die Kopernikanische Lehre*, Hamburgo y Leipzig, 1909; R. Wolf, *Geschichte der Astronornie*, Munich, 1877; H. Zaiser, *Kepler ais Philosoph*, Stuttgart, 1932; E. Zilsel, «Copernicus and mechanics», *J. Hist. of Ideas*, I (1940); E. Zinner, *Die Geschichte der Sternkunde*, Berlín, 1931; *Enístehung und Ausbreitung der Kopernikanischen Lehre (Sitiungsbericbte der physik.-mediz. Sozieíat zu Erlangen)*, Erlangen.

Magnetismo, Electricidad y Optica

Además de las obras indicadas en el volumen I, capítulo 3, y las de la sección siguiente: C. B. Boyer, «Kepler's explanation of the rainbow», *American Journal of Physics*, XVIII (1950); «Descartes and the radius of the rainbow», *Isir*, XLIII (1952); F. Cajori, *A History of Physics*, Nueva York, 1929; Guillermo Gilbert, *De Magnete Magnetisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure*, Londres, 1660 (trad. inglesa por P. F. Motteley, Londres, 1893); N. H. de V. Heathcote, «Guericke's sulphur globe», *Annals of Science*, VI (1950); J. Itard, «Les lois de la réfraction de la lumière chez Kepler», *Revue d'Histoire des Sciences*, X (1957); D. J. Korteweg, «Descartes et les manuscrits de Snellius», *Revue de Metaphysique et morale*, París, IV

(1896); P. Kramer, «Descartes und das Brechungsgesetz des Lichtes», *Abhandlungen zur Geschichte der Mathematik*, IV (1882); G. Leisegang, *Descartes Dioptrik*, Meisenheim am Glan, 1954; J. Lohne, «Thomas Harriot (1560-1621)», *Centauras*, VI (1959); «Zur Geschichte des Brechungsgesetzes», *Sudhoffs Archiv für Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften*, XLVII (1963); Sir Isaac Newton, *Opticks*, 4.^a edic., Londres, 1730 (reimpresión, Londres, 1931; Nueva York, 1952); R. E. Ockenden, «Marco Antonio de Dominis and his explanation of rainbow», *Isis*, XXVI (1936); E. Panofsky, *Albrecht Dürer*, 3.^a edic., Princeton, 1943, 2 vols.; C. E. Papanastassiou, *Les theories sur la nature de la lumière de Descartes á nos jours*, París, 1935; M. Roberts y E. R. Thomas, *Newton and the Origin of Colours*, Londres, 1934 (contiene una reimpresión de la «New Theory about Light and Colours» de Newton, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, VI, 1671-1672); D. H. D. Roller, «The *De Magnete* of William Gilbert», *Isis*, XLV (1954); D. H. D. Roller (ed.), *The Development of the Concept of Electric Charge, Electricity from the Greeks to Coulomb (Harvard Case Histories in Experimental Science*, ed. J. B. Conant, VIII), Cambridge, Mass., 1954; V. Ronchi, *Histoire de la Lumière*, París, 1956; L. Rosenfeld, «La théorie des couleurs de Newton et ses adversaires», *Isis*, IX (1927); «Marcus Marcis Untersuchungen über das Prisma und sein Verhältnis zu Newton's Farbentheorie», *Isis*, XVII (1932); A. I. Sabra, *Theories of Light from Descartes to Newton*, Londres, 1967; R. Suter, «A biographical sketch of Dr. William Gilbert of Colchester», *Osiris*, X (1952); J. A. Vollgraff, «Snellius* notes on the

reflection and réfraction of rays», *Osiris*, I (1936); É. T. Whittaker, *A History of Theories of Ether and Electricity*, Edimburgo, 1951; L. E. Zilsel, «The origins of William Gilbert's scientific method», *J. Hist. of Ideas*, II (1941).

Instrumentos científicos

Además de las obras indicadas en las secciones anteriores y en el volumen I, capítulo 3, Astronomía y Óptica, y capítulo 4, Edificación, etc., y Medicina: M. K. Barnett, «The development of thermometry and the temperature concept», *Osiris*, XII (1956); M. Bishop, *Pascal, the Life of Genius*, Baltimore, 1936; L. C. Bolton, *Time Measurement*, Londres, 1924; R. S. Clay y T. S. Court, *The History of Microscope*, Londres, 1932; A. Danjou y A. Couder, *Lunettes et télescopes*, París, 1935; M. Daumas, *Les Instruments scientifiques au XVII^e et XVIII^e siècles*, París, 1953; C. de Waard, *L'expérience barométrique. Ses antécédents et ses explications*, Thouars, 1936; A. N. Disney, C. F. Hill y W. E. W. Baker, *Origins of the Telescope*, Londres, 1955; Henri Michel, «Les tubes optiques avant la télescope», *Ciel et Terre*, Bruselas, LXX (1954); J. W. Olmsted, «The application of telescopes to astronomical instruments», *Isis*, XL (1949); L. D. Patterson, «The Royal Society's standard thermometer», *Isis*, XLIV (1953); V. Ronchi, *Galileo e il canonicchiale*, Udine, 1942; «Du *De Refractione* au *De Telescopio* de G. B. Della Porta», *Revue d'Histoire des Sciences*, VII (1954); E. Rossen, *The Naming of the Telescope*, Nueva York, 1947; «When did Galileo make his first telescope?» *Centaurus*, II (1951); «Did Galileo

claim he invented the telescope?» *Proceedings of the American Philosophical Society*, XCVII (1954); Singer, E. J. Holmyard y otros, *History of Technology*; Oxford, 1957, III, capítulos de D. J. Price y H. Alan Lloyd; R. W. Symonds, *A History of English Clocks*, Londres, 1947; F. Sherwood Taylor, «The origin of the thermometer», *Annals of Science*, V (1942).

Navegación y Cartografía

Además de las obras indicadas en el volumen I, capítulo 4: J. Delevsky, «L'invention de la projection de Mercator et les enseignements de son histoire», *Isis*, XXXIV (1942); N. H. de V. Heathcote, «Christopher Columbus and the discovery of magnetic variation», *Science Progress* (1932); «Early nautical charts», *Annals of Science*, I (1936); J. E. Hofmann, «Nicolaus Mercator (Kauffmann), sein Leben und werken, vorzugsweise als Mathematiker», *Akademie der Wissenschaften und der Uteralur in Mainz*, Abh. der math.-naturwiss. Klasse, núm. 3, Wiesbaden, 1950; G. H. T. Kimble, *Geography in the Middle Ages*, Londres, 1938; S. Lorant (ed.), *The New World. The firts pictures of America made by Johna White and Jaeques le Moyne*, Nueva York, 1946 (contiene el *Brief and True Report* de Harriot); S. E. Morrison, *Admiral of the Ocean Sea: a Ufe of Christopher Columbus*, Boston, Mass., 1942, 2 vols.; A. P. Newton, *Travel and Travellers of the Middle Ages*, Londres, 1926; E. G. R. Taylor, *Tudor Geography, 1485-1583*, Londres, 1930; *Late Tudor and Early Stuart Geography, 1583-1650*, Londres, 1934; *The Mathematical Practitioners of Tudor and Stuart England*, Cambridge,

1954; L. C. Worth, *The Way of a Ship: an essay on the literature of navigation*, Portland, Me., 1937.

Biología en general

T. Ballauff, *Die Wissenschaft von Leben*, I, Friburgo y Munich, 1954; H. Daudin, *Les Méthodes de la classification et l'idée de série en botanique et zoologie de Linné à Lamarck (1740-1790)*, París, 1926; P. G. Forthergill, *Historical Origins of Organic Evolution*, Londres, 1952; E. Guyénot, *Les Sciences de la vie au XVII^e et XVIII^e siècles*, París, 1941; E. Nordenskiöld, *The History of Biology*, Londres, 1929; C. Singer, *A Short History of Biology*, 2.^a edic., Londres, 1950.

Fisiología experimental

Además de las obras indicadas en el volumen I, capítulo 3: Marie Thérèse d'Alvemy, «Avicenne et les médecins de Venice», *Medioevo e Rinascimento. Studi in onore di Bruno Nardi*, Florencia, 1955; J. P. Arden, *The Circulation of the Blood and Andrea Cesalpino of Brezzia*, Nueva York, 1945; R. H. Bainton, *Michel Servet, hérétique et martyr 1511-1553*, Ginebra, 1953 (edic. inglesa, Boston, 1953) —un estudio bibliográfico; E. Bastholm, *The History of Muscle Physiology*, trad. inglesa por W. E. Calvert, Copenhague, 1950; H. P. Bayon, «William Harvey, physician and biologist», *Annals of Science*, III (1938), IV (1939) —un estudio básico; B. Becker (ed.), *Autour de Michel Servet et de Sébastien Castellion*, Haarlem, 1953; A. G. Berthier, «Le Mécanisme cartésien et la physiologie au XVII^e siècle»,

Isis, II (1914), III (1920); H. Brown, «John Denis and the transfusión of blood, París 1667-1668», *Isis*, XXXIX (1938); G. Canguilhem, *La formation du concept de réflexe aux XVII* el XVIII* siècles*, París, 1955; A Castiglioni, *The Renaissance of Medicine in Italy*, Baltimore, 1934; «GalileoGalilei and his influence on the evolution of medical thought», *Bulletin of History of Medicine*, XII (1942); L. Cauvois, *William Harvey*, Londres y París, 1957; L. D. Cohén, «Descartes and Henry More on the beást-machine», *Annals of Science*, I (1936); J. E. Curtís, *Harvey's Viewr on the Use of Circulation of the Blood*, Nueva York, 1915 —un estudio iluminador; Franklin Fearing, *Reflex Action: a study in the history of phyriological psycbology*, Londres, 1930; D. Fleming, «William Harvey and the pulmonary circulation», *Isis*, XLVI (1955); Sir M. Foster, *Lectures on the History of Physiology during the Sixteenth, Seventeenth and Eighteenth Centuries*, Cambridge, 1901; K. J. Franklin, *A Short History of Physiology*, Londres, 1933; «A survey of the growth of knowledge about certain parts of the foetal cardio-vascular apparatus, and about the foetal circulation, in man and some others animáis. Part I: Galen to Harvey», *Annals of Science*, V (1941); J. F. Fulton, *Selected Readings in the History of Physiology*, Londres, 1930; *Michael Servetus, humanist and martyr*, with a bibliography of his works... por M. E. Stanton, Nueva York, 1953; E. Gilson, *Études sur le rôle de la pensée médiévale dans la formation du système cartésien (Études de la philosophie médiévale, XIII)*, París, 1930 —fundamental; William Harvey, *Works*, trad. por R. Willis, Londres, 1847; *Prelectiones Anatomiae Universalir*, anotado y traducido por D. O'Malley, F. N. L.

Poynter y K. F. Russell, Univ. California Press, 1961; *De Motu Cordis*, texto y trad. por K. J. Franklin, Oxford, 1957; *The Circulation of the Blood*, trad. Franklin, Oxford, 1958; *De Motu Locali Animalium*, Cambridge, 1959; «The William Harvey Issue», *Journal of the History of Medicine*, XII (1957, núm. 2); H. E. Hoff y P. Kellaway, «The early history of the reflex», *Journal of the History of Medicine*, VII (1952); K. D. Keele, *Leonardo da Vinci on Movement of the Heart and Blood*, Filadelfia, 1952; G. Keynes, *Blood Transfusión*, Bristol y Londres, 1949; *The Life of William Harvey*, Oxford, 1966; *Léonard da Vinci et l'expérience scientifique au XVI* siècle*, París, 1953; R. Lower, *De Corde*, trad. por K. J. Franklin en R. T. Gunther, *Early Science in Oxford*, IX; D. McKie, «Fire and the Flamma Vitalis: Boyle, Hooke and Mayow», *Science, Medicine and History*, ed. E. A. Underwood, Oxford, 1953, I; N. S. R. Maluf, «History of blood transfusión», *Journal of the History of Medicine*, IX (1954); M. Meyerhoff, «Ibn An-Nafis (13th century) and his theory of the lesser circulation», *Isis*, XXIII (1935); C. D. O'Malley, *Michael Servetus*, Filadelfia, 1953; Sir W. Osler, *The Growth of Truth as Illustrated in the Discovery of the Circulation of the Blood (Harveyan Oratio)*, Londres, 1906; W. Pagel, «Religious motives in the medical biology of XVth century», *Bulletin of the Institute of History of the Medicine*, III (1935); «William Harvey and the purpose of circulation», *Isis*, XLII (1951); «Giordano Bruno: the philosophy of circles and the circular movement of the blood», *Journal of the History of Medicine*, VI (1951); «The reaction to Aristotle in the seventeenth century biological thought», en *Science, Medicine and History*, ed. E. A. Underwood, Oxford, 1953, I; *William*

Harvey's Biological Ideas, Basilea, 1967; J. R. Partington, *op. cit.*, en «Química» *infra*; D'Arcy Power, *William Harvey*, Londres, 1911; Sir H. Rolleston, «The reception of Harvey's doctrine of the circulation of the blood in England», en *Ersays... presented to Karl Sudhoff*, ed. C. Singer y H. E. Sigerist, Oxford y Zurich, 1924; K. E. Rothschuch, *Entwickelungsgerchichte physiologischer Probleme in Tabellenform*, Munich y Berlín, 1952; *Geschichte der Physiologie*, Berlín, 1953; Sir Charles Sherrington, *The Endeavour of Jean Femel*, Cambridge, 1946; C. Singer, *The Discovery of the Circulation of the Blood*, Londres, 1922; N. Kemp Smith, *op. cit.*, *infra* «Filosofía de la ciencia», etc.; Nicolaus Steno, *A Dissertation of the Anatomy of the Brain... 1665*, Copenhague, 1950 (reimpresión); Nicolai Stenonis, *Epirotolde et epistolae ad eurn datae*, ed. G. Scherz y J. Raeder, Hafniae, 1952, 2 vols.; W. Sterling, *Sorne Apostles of Physiology*, Londres, 1902; P. Tannery, «Descartes physicien», *Revue de Métaphysique* (1896); O. Temkin, «Metaphors of human biology», *Science and Civilization*, ed. R. Stauffer, Madison, Wisc., 1949; J. Trueta, «Michael Servetus and the discovery of the lesser circulation», *Yole Journal of Biology and Medicine*, XXI (1948); C. Webster, «William Harvey's conception of the heart as a pump», *Bulletin of the History of Medicine*, XXXIX (1965).

Química

Además de las obras indicadas en el volumen I, capítulos 3 y 4: E. Bloch, «Die Antike Atomistik in der neueren geschichte der Chemie», *Isis*, I (1913-1914); T. L. Davis, «Boyle's conception of the elements

compared with that of Lavoisier», *Isis*, XVI (1931); Edward Farber, *The Evolution of Chemistry*, Nueva York, 1952; F. W. Gibbs, «The rise of the tinplate industry», *Annals of Science*, VI (1950), VII (1951); Kurt Goldammer, *Paracelsus Sozialethische und Sozialpolitische Schriften*, Tubinga, 1952; J. C. Gregory, *Short History of Atomism from Democritus to Bohr*, Londres, 1931; *Combustión from Heraclitus to Lavoisier*, Londres, 1934; Thomas S. Kuhn, «Robert Boyle and structural chemistry in the seventeenth century», *Isis*, XLIII (1952); K. Lasswitz, *Geschichte der Atomistik vom Mittelalter bis Newton*, 2 vols., Leipzig, 1960; H. Metzger, *Les Doctrines chimiques en France du début du XVII^e à la fin du XVIII^e siècle*, París, 1923; R. Multhaus, «Medical chemistry and the 'Paracelsians'», *Bulletin of the History of Medicine*, XXVIII (1954); L. K. Nash (ed.), *The Atomic-Molecular Hypothesis (Harvard Case Histories in Experimental Science*, ed. J. B. Conant, IV), Cambridge, Mass., 1950; «The origin of Dalton's Chemical atomic theory», *Isis*, XXVII (1956); Henry M. Pachter, *Paracelsus, Magic into Science*, Nueva York, 1951; W. Pagel, «The religious and philosophical aspects of van Helmont's science and medicine», *Bull. Hist. Medicine* (1944, Suppl. 2); *Paracelsus*, Basilea y Nueva York, 1951; J. R. Partington, *A Short History of Chemistry*, Londres, 1937; «Jean Baptiste van Helmont», *Annals of Science*, I (1936); «The origins of the atomic theory», *ibid.*, IV (1939); «The life and work of John Mayow (1641-1679)» *Isis*, XLVII (1956); T. S. Patterson, «John Mayow in contemporary setting», *Isis*, XV (1931); Jean Rey, *Essays*, ed. D. McKie, Londres, 1951; H. E. Sigerist, *Paracelsus in the Light of Four Hundred Years*, Nueva York, 1941; G.

B. Stones, «The atomic view matter in the XVth, XVIth y XVIIth centuries», *Isis*, X (1928); C. M. Taylor, *The Discovery of the Nature of Air*, Londres, 1923; J. H. White, *History of the Phlogiston Theory*, Londres, 1932.

Geología

Además de la lista del volumen I, capítulo 3: D. R. Rome, «Nicolás Stenon et la Royal Society of London», *Isis*, XII (1956); C. Schneer, «The rise of historical geology in the seventeenth century», *Isis*, XLV (1954); Nicholas Steno, *Prodromus...*, trad. inglesa por J. G. Winter, Nueva York, 1916; H. R. Thompson, «The geographical and geological observations of Bernard Palissy the potter», *Annals of Science*, X (1954); Karl von Zittel, *History of Geology and Palaeontology*, traducido por M. M. OgilvieGordon, 1901.

Botánica

Además de las obras indicadas en el volumen I, capítulo 3: Arber, *Herbáís*, Cambridge, 1938; W. Blunt, *The Art of Botanical IU lustration*, Londres, 1950; C. Demars, «Rembert Dodoens, 29.6.1517-10.3.1585», *III Congrès National des Sciences*, Bruselas, 1950; F. G. D. Drewitt, *The Romance of the Apothecaries Garden at Chelsea*, Londres, 1928; Knut Hagberg, *Cari Linnaeus*, Londres, 1952; R. Hooke, *Micrographia*, Londres, 1665 (reimpreso en R. T. Gunther, *Early Science in Oxford*, XIII, Oxford, 1938); C. E. Raven, *John Ray*, Cambridge, 1942; *English Naturalists from Neckam to Ray*, Cambridge, 1947; J. Sachs, *History of Botany, 1530-1860*,

trad. por H. E. F. Garnsey e I. B. Balfour, Oxford, 1890.

Anatomía y Zoología

Además de las obras indicadas en el volumen I, capítulo 3: L. Choulant, *History and Bibliography of Anatomical Illustrations*, trad. y anotado por M. Frank, Nueva York, 1945; F. J. Colé, *A History of Comparative Anatomy*, Londres, 1944; H. Cushing, *A Bio-Bibliography of Andreas Vesalius*, Nueva York, 1943; P. Delaunay, *L'Aventureuse existence de Fierre Belon de Mans*, París, 1926 (también *Revue du Seizième Siècle*, París, IX-XIII, 1922-1925); C. C. Gillispie, *Genesis and Geology*, Cambridge, Mass., 1951 —para una bibliografía de la evolución en el siglo XVm; E. W. Gudger, «The five great naturalists of the 16th century, Belon, Rondelet, Salviani, Gesner and Aldrovandi: a chapter in the history of ichthyology», *Isis*, XII (1934); R. Herrlinger, *Volcher Coiter, 1534-1576 (Beiträge zur Geschichte der Medizinischen und Naturwissenschaftlichen Abbildung, I)*, Nuremberg, 1952; H. Hopstock, «Leonardo as anatomist», en *Studies in the History and Method of Science*, ed. C. Singer, Oxford, 1921, II; S. W. Lambert, W. Wiegand y W. Ivins, jr., *Three Vesalian Essays*, Nueva York, 1952; Leonardo da Vinci, *Notebooks*, ordenados, traducidos al inglés y con una introducción por MacCurdy, Londres, 1938, 2 vols.; *Uterary Works*, ed. J. P. e I. A. Richter, Oxford, 1939, 2.^a edic., 2 vols.; Willy Ley, *Konrad Gesner, Leben und Werke (Münchener Beiträge zur Geschichte und Lieteratur der Naturwissenschaften, XV-XVI)*, Munich, 1929; J. P. Murrich, *Leonardo da Vinci the Anatomist*, Baltimore, 1930; C. D. O'Malley y

J. B. de C. M. Saunders, *Leonardo da Vinci on the Human Body*, los dibujos anatómicos, fisiológicos y embriológicos de Leonardo da Vinci, con traducción, correcciones y una introducción bibliográfica, Nueva York, 1952; M. F. Ashley Montagu, *Edward Tyson, M. D., F. R. S., 1650-1708, and the rise of human and comparative anatomy in England (Memoirs of the American Philosophical Society, XX)*, Filadelfia, 1943; Vittorio Putti, *Berengario da Carpí*, Bolonia, 1937; E. Radl, *Geschichte der biologischen Theorien*, Parte I, Leipzig, 1905; E. S. Russell, *Form and Function*, Londres, 1916 —fundamental para la historia de la anatomía comparada; J. B. de C. M. Saunders y C. D. O'Malley, artículos sobre Vesalio en *Studies and Essays... offered to George Sarton*, ed. M. F. Ashley Montagu, Nueva York, 1944, y en *Bulletin of Medical History*, XIV (1943); *The Illustrations from the Works of Andreas Vesalius of Brussels*, Cleveland y Nueva York, 1950; C. Singer y C. Rabin, *A Prelude to Modern Science*, Cambridge, 1946 —sobre las *Tabulas Anatomicae Sex* de Vesalio; *Vesalius on the Human Brain*, traducciones por C. Singer, Londres, 1952.

Embriología y Genética

Además de las obras mencionadas en el volumen I, capítulo 3: H. P. Bayon, «William Harvey (1578-1657): his application of biological experiment, clinical observation and comparative anatomy to the problems of generation», *Journal of the History of Medicine*. II (1947); F. J. Colé, *Early Theories of Sexual Generation*, Oxford, 1930; A. C. Crombie, «P. L. M. de Maupertius, F. R. S. (1698-1759),

précurseur du transformisme», *Revue de Synthèse*, LXXVIII (1957); C. Dobell, *Antony van Leeuwenhoek and his «úttle Animáis»*, Londres, 1932; *The Embriological Treatises of Hietonymus Fabricius*, ed. H. B. Adelman, Nueva York, 1942; A. van Leeuwenhoek, *Collected Letters*, Amsterdam, 1939; A. W. Meyer, *An Analysir of the De Generatione Anirnalium of William Harvey*, Stanford, Cal., 1936; «Leeuwenhoek as experimental biologist», *Osiris*, III (1937); *The Rise of Ernbiology*, Stanford, Cal., 1939; J. Needham, *A History of Embriology*, Cambridge, 1934; W. Pagel, «J. B. van Helmont, *De Tempore*, and biological time», *Osiris*, VIII (1948); F. Redi, *Opere*, Nápoles, 1778; Milán, 1809-1811 (trad. inglesa de *Experiments on the Generation of Inrects*, Chicago, 1909); Singer, «The drawn of microscopical discovery», *Journal of Royal Microscopical Society*, XXXV (1915).

Medicina

Además de la lista del volumen I y las indicadas *supra*: Campbell, «The medical curriculum of the universities of Europe in the sixteenth century», en *Science, Medicine and History*, ed. E. A. Underwood, Oxford, 1953; A. Castiglioni, «The medical school of Padua and the renaissance of medicine», *Annals of Medical History*, N. S. VII (1935); J. D. Comrie, *Selected Works of Thomas Sydenham*, con una breve biografía, Londres, 1922; P. Dalaunay, *La Vie médicale aux XVI^e, XVII^e et XVIII^e siecles*, París, 1935; John F. Ful ton, *The Great Medical BibUographers: a study in humanism*, Filadelfia, 1951; D. A. Wittop Koning (ed.), *Art and Pharmacy*,

Deventer (Holland), 1950; Ambrose Paré, *The Apologie and Treatise*, traducido por T. Johnson, 1634, ed. G. Keynes, Londres, 1951; *Textes choisis*, présentés et commentés par L. Delamelle, París, 1953; G. Sudhoff, *Aus der Frühgeschichte der Syphilis (Studien der Medizin, IX)*, Leipzig, 1912.

Filosofía de la naturaleza en su ambiente intelectual (siglos XV A XVII)

Cf. las obras indicadas en el volumen I, capítulos 1, 2 y 3 (Filosofía, Astronomía, Mecánica), y la Bibliografía adicional, y en este volumen *supra* en capítulos 1 y 2 (Pensamiento científico) y la indicada *infra*. Deberán ser consultados los artículos bibliográficos críticos importantes del volumen anual de *History of Science* (Cambridge, 1962). Los siguientes son útiles sobre algunos pensadores: *Galileo* (cf. *supra* en capítulo 2, Mecánica, Astronomía): P. Ariotti, «Galileo on the isochrony of the pendulum», *Isis*, LVIII (1968); M. L. Altieri Biagi, *Galileo e la terminología tecnico-scientifica*, Florencia, 1965; M. Qavelin, *La Philosophie naturelle de Galilée*, París, 1968; A. C. Crombie, con la colaboración de A. Carago, *Galileo and Mersenne: theories of science, nature and the senses*, 2 vols., Domus Galilaeana, Pisa: Florencia y Londres, aparecerá en breve —con una extensa bibliografía; A. Favaro, *Galileo Galilei a Padova*, 1968; Galileo Galilei, *Dialog über die Briden Hauptsachlichsten Weltsysteme, das Ptolemäische und das Kopernikanische*, traducido del italiano y adarado por Von E. Strauss, Leipzig, 1891; *Discorsi 'e dimostrazione matematiche intorno*

a due nuove scienze, ed. A. Carago y L. Geymonat, Turín, 1958; *Nel Terzo centenario della morte di Galileo Galilei*, Milán, 1942; *Nel Quarto centenario della nascita di Galileo Galilei*, Milán, 1966; *Atti del Symposium internazionale di... Galileo, Firenze 1964*, Florencia, 1967; *Saggi au Galileo Galilei*, Florencia, en prensa —una serie importante de ensayos apareados como reimpressiones desde 1967; R. Giacomelli, *Galileo Galilei giovane e il suo «De Motu»*, Pisa, 1949; N. W. Gilbert, «Galileo and the school of Padua», *Journal of the History of Philosophy*, I (1963); C. L. Colino, *Galileo Reappraised*, Berkeley y Los Angeles, Cal., 1966; M. Kaplo (ed.), *Hommage to Galileo*, Cambridge, Mass., 1965; O. Loretz, *Galilei und der Irrtum der Inquisition*, Kevelaer, 1966; G. Morpurgo-tagliabue, *I processi di Galileo e l'epistemologia*, Milán, 1963; S. Moscovici, *l'Expérience du mouvement: JeanBaptiste Baliani, disciple et critique de Galilée*, París, 1967; P. Paschini, *V/7a e opere di Galileo Galilei*, Roma, 1965; K. R. Popper, «Three views concerning human knowledge», en *Contemporary British Philosophy* (Third Series), Londres, 1956; C. B. Schmitt, «Experience and experiment: a comparison of Zabarella's view with Galileo's in *De Motu*», *Studies in Renaissance*, XVI (1969); W. R. Shea, un libro que aparecerá sobre Galileo. *Francis Bacon*: F. H. Anderson, *Philosophy of Francis Bacon*, Chicago, 1948; Sir Francis Bacon, *Works*, ed. J. Spedding, R. L. Ellis y D. D. Heath, Londres, 1857-1859; *Letters and Life*, ed. J. Spedding, Londres, 1861-1874; Farrington, *Francis Bacon, philosopher of industrial Science*, Nueva York, 1949; *The Philosophy of Francis Bacon*, Liverpool, 1964; S. B. L. Penrose, jr., *The Reputation and Influence*

of Francis Bacon in the seventeenth Century, Nueva York, 1934; P. Rossi, Francesco Bacone: dalla magia alia *scienza*, Bari, 1957. *William Harvey* (cf. *supra* en capítulo 2, Fisiología): M. L. von Brunn, *Kreislauffunktion in William Harvey Schriften*, Londres, 1965; W. Pagel, «The Position of Harvey and van Helmont in the history of European thought», *Journal of the History of Medicine*, XIII (1958); «An Harvey prelude to Harvey», *History of Science*, II (1963); «William Harvey revisited», *History of Science*, VIII (1969), IX (1970); G. Whitteridge, *William Harvey and the Circulation of the Blood*, Londres y Nueva York, 1971. *Descartes* (cf. *supra* en capítulo 2, Mecánica, Óptica): C. Adam, «Vie et oeuvres de Descartes», en *Oeuvres*, ed. C. Adam y P. Tannery, XII, París, 1910; A. G. A. Balz, *Carterian Studies*, Nueva York, 1951; Descartes, *Correspondance*, ed. C. Adam y G. Milhaud, París, 1936; A. Gerwitz, «Experience and the non-mathematical in the Cartesian method», *Journal of the History of Ideas*, II (1941); E. Gilson, *Index scholastico-cartésien*, París, 1912; H. Hervey, «Hobbes and Descartes in the light of some unpublished letters of the correspondance between Sir Charles Cavendish and Dr. John Pell», *Osiris*, X (1952); A. Koyré, *Eníretiens sur Descartes*, El Cairo, 1937; París, 1962; S. P. Lamprecht, «The role of Descartes in seventeenth century England», *Studies in the History of Ideas*, III (1935); M. Leroy, *Descartes, le philosophe au masque*, París, 1929; *Descartes social*, París, 1931; G. Milhaud, *Descartes savant*, París, 1921; L. Roth, *Descartes' Discourse on Method*, Oxford, 1937; H. Scholz, A. Kratzer y J. E. Hofmann, *Descartes*, Münster, 1951; G. Sebba, *Descartes and his Philosophy*:

a bibliographical guide to literature, 1800-1958, Athens, Ga., 1959; Kemp Smith, *New Studies in the Philosophy of Descartes*, Londres, 1952; *Descartes' Philosophical Writings*, Londres, 1952. Newton (cf. *supra* en capítulo 2, Mecánica, Óptica); H. G. Alexander (ed.), *The Leibnitz-Clarke Correspondence*, Manchester, 1956; I. B. Cohén, *Franklin and Newton*, Filadelfia, 1956; *Introduction to Newton's 'Principie'*, Cambridge, 1971; W. J. Greenstreet (ed.), *Isaac Newton, Memorial Volume*, Londres, 1927; P. M. Heimann y J. E. McGuire, «Newtonian forces and Lockean powers: concepts of matter in eighteenth century thought», *Historical Studies in the Physical Sciences*, III (1971); W. G. Hiscock, *David Gregory, Isaac Newton and their Circle*, Oxford, 1937; History of Science Society, *Isaac Newton*, Londres, 1928; A. Koyré, *Newtonian Studies*, Londres, 1965; A. Koyré e I. B. Cohén, *Isaac Newton's Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Cambridge, 1972; J. E. McGuire, «Atoms and the 'Analogy of Nature*» *Studies in the History and Philosophy of Science*, I (1970); J. E. McGuire y P. M. Rattansi, «Newton and the 'Pipes of Pan'», *Notes and Records of the Royal Society*, XXI (1966); F. E. Manuel, *Isaac Newton, Historian-*, Cambridge, Mass., 1963; *A Portrait of Isaac Newton*, Cambridge, Massachusetts, 1968; R. Palter (ed.), *The 'Aftnus Mirabilis' of Sir Isaac Newton: 1666-1966*, Cambridge, Mass., y Londres, 1970; Sir Isaac Newton, *Correspondence of Sir Isaac Newton and Professor Cotes*, ed. J. Edleston, Londres y Cambridge, 1850; *The Correspondence*, ed. H. W. Turnbull, Cambridge, 1959; *Theological Manuscripts*, seleccionados y editados, con una introducción de M. McLachlan,

Liverpool, 1950; *Papers and Letters on Natural Philosophy*, ed. I. B. Cohén, Cambridge, 1958; *Unpublished Scientific Papers*, ed. A. Rupert Hall y M. Boas Hall, Cambridge, 1962; F. Oakley, «Christian theology and Newtonian science; the rise of the concept of laws of nature», *Church History*, XXX (1961); Rohault's, *System of Natural Philosophy, illustrated with Dr. Samuel Clarke's notes taken mostly out of Sir Isaac Newton's Philosophy*, traducido al inglés por John Clarke y ed., Londres, 1728-1729; The Royal Society, *Newton Tercentenary Celebrations 15-19 July 1946*, Cambridge, 1947; R. S. Westfall, «The foundations of Newton's philosophy of Nature», *The British Journal of the History of Science*, I (1962); R. W. Westfall, *Forcé in Newton's Physics*, Londres, 1971. Además hay: R. I. Aaron, *John Locke*, 2.^a edic., Oxford, 1955; Académie Internationale d'Histoire des Sciences, *Actes du Symposium international des Sciences physiques et mathématiques dans la première moitié du XVII^e siècle*, Florencia y París, 1960; D. C. Allen, *The Legend of Noah: Renaissance Rationalism in Art, Science and Letters (Illinois Studies in Language and Literature)*, XXXIII, Urbana, 1949); *Boubt's Boundless Sea: skepticism and Faith in the Renaissance*, Baltimore, Md., 1964; R. Allers, «Microcosmos from Anaximandro to Paracelsus», *Traditio*, II (1944); P. J. Ammán, «The musical theory and philosophy of Robert Fludd», *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes*, XXX (1967); F. H. Anderson, «The influence of contemporary science on Locke's method and results», *University of Toronto Studies: Philosophy*, II. L (1923); G. Ascoli, *La Grand-Bretagne devant l'opinion française au XVII^e siècle*, París, 1930; T.

Aston (ed.), *Crisis in Europe 1560-1660: essays from Past and Present*, Londres, 1965; N. Badaloni, *La filosofía di Giordano Bruno*, Florencia, 1955; Tommaso Campanella, Milán, 1965; Amir Mehdi Badi', *L'idée de la méthode des Sciences*, I, introduction, París, 1953; C. Baker, *The Wars of Truth: Studies in the decay of Christian humanism in the early seventeenth century*, Cambridge, Mass., 1952; *The Race of Time: three lectures on Renaissance historiography*, Toronto, 1967; J. M. Baldwin (ed.), *Dictionary of Philosophy and Psychology*, Nueva York y Londres, 1901-1905; Isaac Barrow, *Mathematical Lectures read in the Public Schools at the University of Cambridge*, trad. por J. Kirby, Londres, 1734; M. A. Bera (ed.), *Pascal, L'homme et l'oeuvre*, París, 1956; George Berkeley, «De Motu», en *The Works of George Berkeley*, ed. A. A. Luce y T. E. Jessop, IV, Londres y Edimburgo, 1951; «George Berkeley Bicentenary», *The British Journal for the Philosophy of Science*, IV (1953); R. M. Blake, C. J. Ducasse y E. H. Madden, *Theories of Scientific Method: the Renaissance through the nineteenth century*, Seattle, 1960; L. Blanchet, *Campanella*, París, 1920; J. L. Blau, *The Christian Interpretation of the Cabala in the Renaissance*, Nueva York, 1944; O. R. Bloch, *La Philosophie de Gassendi*, La Haya, 1971; M. Boas, «The establishment of the mechanical philosophy», *Osiris*, X (1952); «La méthode scientifique de Robert Boyle», *Revue d'Histoire des Sciences*, IX (1956); W. Bohm, «John Mayow and Descartes», *Sudhoff Archiv*, XLVI (1962); «John Mayow and his contemporaries», *Ambix*, XI (1963); G. Bonoo, *Les Relations intellectuelles de Locke avec la Trance*, Berkeley y Los Angeles, 1955; F. Brandt, *Thomas Hobbes'*

Mechanical Conception of Nature, Londres, 1928; E. Bréhier, *Histoire de la Philosophie*, París, 1942-1943; G. S. Brett, *The Philosophy of Gassendi*, Londres, 1908; *History of Psychology*, ed. y resumido por R. S. Peters, Londres, 1953; K. C. Brown, *Hobbes Studies*, Oxford, 1965; P. Brunet, «La méthodologie de Mariotte», *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, 1947; L. Brunschwig, *Les étapes de la philosophie mathématique*, París, 1929; G. Buchdahl, *Metaphysics and the Philosophy of Science*, Oxford, 1970; E. A. Burtt, *The Metaphysical Foundations of Modern Physical Science*, Londres, 1932; H. Busson, *Le Rationalisme dans la littérature française de la Renaissance (1533-1607)*, París, 1957; *New Cambridge Modern History*, II-VI, Cambridge, 1958-1970; Cassirer, *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neueren Zeti*, Berlín, 1922-1923; *Individuum und Kosmos in der Philosophie der Renaissance*, Leipzig, 1927; «The influence of language upon the development of scientific thought», *The Journal of Philosophy*, XXXIX (1942); *The Philosophy of Enlightenment*, trad. inglesa, Princeton, 1951 (ed. alemana, 1932); A. Chaouis y E. Droz, *Autómata: a historical and technological study*, Neuchâtel y Londres, 1958; N. H. Chulée, «John Dee's mathematics», *Ambix* (1957); R. G. Collingwood, *The Idea of Nature*, Oxford, 1945; Comenius, *The Way of Light*, trad. por E. T. Campagnac, Liverpool, 1938; Comte, *Cours de Philosophie positive*, París, 1830-1842; A. C. Crombie (ed.), *Scientific Change*, Londres y Nueva York, 1963; «The mechanistic hypothesis and the scientific study of vision», *Proceedings of the Royal Microscopical Society*, II (1967); *Historical Studies in Scientific*

Thinking, Londres, en prensa; «Mathematics, music and medical science», *Actes du XII^e Congrès International d'Histoire des Sciences, Parir 1968*, París, 1971; con J. V. Pepper, B. Quinn, J. W. Shirley y R. C. H. Tanner, «Thomas Harriot (1560-1621)», *The Times Literary Sipplement* (23 octb. 1969); Czeschoslovak Academy of Sciences, *Acta Historiae rerum naturalium necnon technicarum*, Praga, 1965-1968; A. G. Debus, *The English Paracelrianr*, Londres, 1965; *Science and Education in Seventeenth Century England: The Webrter-Ward debate*, Londres y Nueva York, 1970; con P. P. Multhauf, *Alchemy and Chemistry in the Seventeenth Century* (William Andrews Clark Memorial Library, University of California, Los Angeles, 1966); J. H. Dempster, «John Locke, physician and philosopher», *Annals of Medical History*, IV (1932) —con bibliografía; K. Dewhurst, *Dr. Thomas Sydenham (1624-1689)*, Londres, 1966; *John Locke (1632-1704), Psyrician and Philosopher*, Londres, 1963; *Dictionnaire apologétique de la foi catholique*, París, 1922-1931; S. Drake e I. E. Drabkin, *Mechanics in Sixteenth Century Italy*, Madison, Wisc., 1969; A. Duhamel, *Des méthodes dans les Sciences de raisonnement*, París, 1856-1870; P. Duhem, *La théorie physique: son object, sa structure*, París, 1914; R. J. Durling, «Achronouical ccnsus of Renaissance editions and translations of Galen», *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes*, XXIV (1961); *Encyclopedia of World Art*, Nueva York y Roma, 1959-1968; W. K. Fergurson, E. Panofsky y otros, *The Renaissance: six essays*; Nueva York, 1962; S. Finch, *Sir Thomas Browne: a doctor's Ufe of science and faith*, Nueva York, 1950; L. Firpo, *Bibliografia degli scritti di Tommaso*

Campanella, Turín, 1940; *Ricerche Campanelliane*, Florencia, 1947; «Filosofía italiana e Controriforma», *Rivista di Filosofia*, XLI (1950), XLII (1951); H. Fisch, «The scientist as priest: a note on Robert Boyle's natural theology», *Isis*, XLIV (1953); M. Foucault, *Histoire de la folie*, París, 1961; *Naissance de la clinique*, París, 1963; *Les Mots et les choses*, París, 1966; *VArchéologie du savoir*, París, 1969; J. T. Fraser (ed.), *The Voice of Time*, Nueva York, 1966; P. J. French, *John Dee: the world of an Elizabethan Magus*, Londres, 1972; A. G. Gargani, *Hobbes e la scienza*, Turín, 1971; E. Garin, *Humanismo italiano: filosofia e vita civile nel Rinascimento*, Bari, 1952; *Medioevo e Rinascimento*, Bari, 1954; *La cultura filosófica del Rinascimento italiano*, Florencia, 1961; «Gli umanisti e la scienza», *Rivista di Filosofia*, LII (1961); *Scienza e vita civile nel Rinascimento italiano*, Bari, 1965; *Storia della filosofia italiana*, Turín, 1966; *Fierre Gassendi, sa vie et son oeuvre*, París, 1955; B. Gille, *Les ingénieurs de la Renaissance*, París, 1964; T. Gregory, *Scetlirismo e empirismo: studio su Gassendi*, Bari, 1961; F. C. Haber, *The Age of the World: Moses to Darwin*, Baltimore, Md., 1959; «The Darwinian revolution in the concept of time», *Studium Générale*, XXIV (1971); M. Boas Hall, *Nature and Nature's Laws*, Londres, 1970; R. Harré, *Matter and Method*, Londres, 1964; V. I. Harris, *All Coherence Gone*, Chicago, 1949; H. C. Hayden, *The CounterRenaissance*, Nueva York, 1950; S. K. Heninger, jr., «Tudor literature of physical Sciences», *The Huntington Library Quarterly*, XXXII (1969); M. B. Hesse, «Gilbert and the historians», *The British Journal for the Philosophy of Science*, XI (1960); *Forces and Fields: a study of action at a distance*,

Londres, 1961; «Hooke's philosophical algebra», *Isis*, LVII (1966); R. Hooykaas, *Religión and the Rise of Modern Science*, Edimburgo, 1972; W. S. Howell, *Logic and Rhetoric, 1500-1700*, Princeton, 1956; J. Jacquot, «Un amateur de science, ami de Hobbes et de Descartes, Sir Charles Cavendish and his learned friends», *Annals of Science*, VIII (1952); artículos sobre Harriot y Hobbes en *Notes and Records of the Royal Society*, IX (1952); E. Kant, *Crítica de la Razón Pura* (2ª edic., 1787); *Crítica del Juicio* (1790); A. G. Keller, *A Theatre of Machines*, Londres, 1964; «Pneumatics, autómatas and the vacuum in the work of Giambattista Aleotti», *The British Journal for the History of Science*, III (1967); B. Kieszkowski, *Studi sul platonismo del Rinascimento in Italia*, Florencia, 1936; H. M. Knox, «Petty's advice to Hartlib», *British Journal of Education Studies*, L (1952); A. Koyré, *Mystiques, spirituels, alchémistes*, París, 1955; *From the Closed World to the Infinite Universe*, Baltimore, 1957; *Études d'histoire de la pensée identifiqúe*, París, 1966; *Metaphysics and Measurement: essays in scientific revolution*, Londres, 1968; Leonardo da Vinci, *Dessins anatomiques*, selección por P. Huard, París, 1961; *Dessins identifiqúes et techniques*, selección por P. Huard y M. D. Grmek, París, 1962; P. Mathias (ed.), *Science and Society 1600-1900*, Cambridge, 1972; S. I. Mintz, *The Hunting of Leviathans seventeenth century reactions to the materialism and moral philosophy of Thomas Hobbes*, Cambridge, 1962; *Mélanges Alexandre Koyré*, 2 vols., París, 1964; P. O. Kristeller, *The Philosophy of Marsilio Ficino*, Nueva York, 1943; *Renaissance Thought*, Nueva York, 1961-1965, 2 vols.; *Eight Philosophers of the*

Italian Renaissance, Londres, 1965; T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolution*, Chicago, 1962; I. Lakatos y A. Musgrove (eds.), *Criticism and the Growth of Knowledge*, Londres, 1965; A. Lange, *Geschichte des Materialismus*, 3. Aufl., Leipzig, 1873-1875, 2 vols. (trad. inglesa, Londres, 1925); R. Lenoble, *Marín Mersenne*, París, 1943; *Esquisse d'une histoire de l'idée de nature*, París, 1969; J. Lohne, «Thomas Harriot (1560-1621): the Tycho Brahe of optics», *Centauros*, VI (1959); «The fair fame of Thomas Harriot», *Centauros*, VIII (1963); A. O. Lovejoy, *The Great Chain of Being*, Cambridge, Mass., 1963; L. Mabileau, *Histoire de la philosophie atomistique*, París, 1895; Maccagni (ed.), *Atti del Primo Convegno Internazionale di Recognizione delle Fonti per la Storia della Scienza Italiana: i Sccoli XIV-XVI*, Domus Galilaeana, Pisa y Florencia, 1967; G. Martin, *Kaní's Metaphysics and Theory of Science*, Manchester, 1955; F. S. Marvin, *Comte, the founder of sociology*, Londres, 1936; H. Metzger, *Les Concepts identifiqes*, París, 1926; E. Meyerson, *De L'Explication dans les Sciences*, París, 1921; *Identie et réalité*, París, 1926; P. H. Michel, *La Cosmologie de Giordano Bruno*, París, 1962; J. S. Mili, *Auguste Comte and Positivism*, Londres, 1866; J. Mittelstrasse, *Neuzeit und Afklárung*, Berlín y Nueva York, 1970; R. Mondolfo, *Alie origini della filosofia della cultura*, Bolonia, 1956; *Figure e idee della filosofia del Rinascimento*, Florencia, 1963; B. Nardi, *Saggi di Aristolelismo Padovano dal secólo XIV al XVI*, Florencia, 1958; J. J. O'Brien, «Some Commonwealth schemes for the advancement of learning», *British Journal of Education Studies*, XVII (1968); D. J. O'Connor (ed.), *A Critical History of Western*

Philosophy, Nueva York, 1964; B. O'Kelly (ed.), *The Renaissance Image of Man and the World*, Ohio State University, 1966; C. D. O'Malley, «Tudor medicine and biology», *The Huntington Library Quarterly*, XXXII (1968); ed. *Leonardo's Legacy*, Berkeley y Los Angeles, 1969; W. J. Ong, «System, space and intellect in Renaissance symbolism», *Bibliothèque d'Humanisme et Renaissance, Travaux et Documents*, XVIII (1956); Ramus, *Method and the Decay of Dialogue*, Cambridge, Mass., 1958; A. Pacchi, *Convenzione e ipotesi nella formazione della filosofia naturale di Thomas Hobbes*, Florencia, 1965; R. Pintard, *Le Libertinage érudit dans la première moitié du XVIII^e siècle*, París, 1943; M. Polanyi, *Personal Knowledge*, Londres, 1958; R. H. Popkin, *The History of Scepticism from Erasmus to Descartes*, Assen, 1964; K. R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, Londres, 1957 (trad. inglesa de *Logic der Forschung*, Viena, 1935); P. M. Rattansi, C. Hill, R. Hall y M. Boas Hall, «The intellectual origine of the Royal Society», *Notes and Records of the Royal Society*, XXIII (1968); A. Renaudet, *Préréforme et humanisme h París pendant les premières guerres d'Italie (1494-1517)*, París, 1953; H. H. Rhys (ed.), *Seventeenth Science and the Arts*, Princeton, 1961; W. Risse, *Die Logik der Neuzeit: 1 Band 1500-1640*, Stuttgart-Bad Cannstatt, 1964; J. Roger, *Les Sciences de la vie dans la pense française du XVIII^e siècle*, París, 1963; E. Rosen, *Kepler's «Somnium»*, Madison, Wisc., 1967; L. D. C. Rosenfield, *From Beats-Machine to ManMachine*, Nueva York, 1941; M. Rossi, *Alie fonti del deísmo e del materialismo modernt*, Florencia, 1942; P. Rossi, *Philosophy, Technology and the*

Arts in the Early Modern Era, Nueva York, 1970; G. Saitta, *II Pensiero italiano nell'Umanesimo e nel Rinascimento*, Florencia, 1961; A. M. Schmidt, *La Poésie identifique en France au seizième siècle*, París, 1938; *La Science au seizième siècle: Colloque International Royaumont 1957*, París, 1960; J. Shapiro, «Latitudinarianism and science in seventeenth century England», *Past and Present*, núm. 40 (1968); «The universities and science in the seventeenth century England», *Journal of British Studies*, X (1971); Sir Sherrington, *Man on his Nature*, Cambridge, 1940; J. W. Shirley, «An early experimental determination of Snell's Law», *American Journal of Physics*, XIX (1951); E. Simard, *La Nature et la portée de la méthode scientifique, exposé et textes choisis de philosophie des Sciences*, Quebec y París, 1956; C. S. Singleton (ed.), *Art, Science and History in the Renaissance*, Baltimore, Md., 1968; *Le Soleil à la Renaissance*, Bruselas, 1965; G. Sortais, *La Philosophie moderne depuis Bacon jusqu'à Leibnitz*, París, 1920-1922, 2 vols.; R. C. Stauffer (ed.), *Science and Civilization*, Madison, Wisc., 1949; M. B. Stilwell, *The Awakening Interest in Science during the First Century of Printing 1450-1550*, Nueva York, 1970; L. Strauss, *The Political Philosophy of Hobbes*, Oxford, 1936; R. Taton, *Causalité accident et la découverte scientifique*, París, 1955; K. V. Thomas, *Religion and the Decline of Magic*, Londres, 1971; E. M. W. Tillyard, *The Elizabethan World Picture*, Londres, 1943; S. Toulmin y J. Goodfield, *The Discovery of Time*, Londres, 1964; Uereweg, *Grundriss der Geschichte der Philosophie*, III; *Die Philosophie der Neuzeit bis zum Ende des 18. Jahrhunderts*, 12.^a edic., ...de M.

FrischheisenKöhler y W. Moog, Berlín, 1924; A. Ungerer, *L'Horloge astronomique de la Cathédrale de Strasboug*, París, 1922; H. G. van Leeuwen, *The Problem of Certainty in English Thought, 1630-1680*, La Haya, 1963; C. Vasoli, *La diale (tica e la retorica dellVmane simo: «invezione» e «método» nella cultura del XV e XVI reholó*, Milán, 1968; H. Védrine, *La Conception de la nature chez Giordano Bruno*, París, 1967; D. P. Walker, «The Prisca Theologia in France», *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes*, XVII (1954); *Spiritual and Demonic Magic from Ficino to Campanella*, Londres, 1958; «Kepler's celestial music», *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes*, XXX (1967); J. W. N. Watkins, *Hobbes* System of Ideas*, Londres, 1965; M. Weber, *The Protestant Ethic and the Spirit of CapitaUsm*, traducción T. Parsons, Nueva York, 1958; R. S. Westfall, «Unpublished Boyle papers relating to scientific method», *Annals of Science*, XII (1956); *Science and Religion in Seventeenth Century England*, New Haven, Conn., 1958; W. Whcwell, *Philosophy of the Inductive Sciences*, Londres, 1840-1847, 2 vols.; *Novum Organum Renovatum*, 3.^a edic., Londres, 1858; *On the Philosophy of Discovery*, Londres, 1860; A. N. Whitehead, *Science and the Modern World*, Cambridge, 1926; P. P. Wiener, «The experimental philosophy of Robert Boyle», *The Philosophical Review*, XLI (1923); W. P. D. Kightman, *The Ernurgence of Scientific Medicine*, Edimburgo, 1971; *Science in a Renaissance Society*, Londres, 1972; B. Willey, *The Seventeenth Century Background*, Londres, 1934; E. Wind, *Pagan Mysferies in the Renaissance*, Londres, 1967; William Wotton, *Reflections upon Ancient and Modern Learning*, Londres, 1964; F. A.

Yates, *Giordano Bruno and the Hermetic Tradition*, Londres, 1964; *The Art of Memory*, Londres, 1966; *Theatre of the World*, Londres, 1969; J. W. Yolton, *Locke and the Compass of Human Understanding*, Cambridge, 1970; R. M. Yost, jr., «Sydenham's philosophy of science», *Osiris*, IX (1950); «Locke's rejection of hypotheses about submicroscopic events», *Journal of the History of Ideas*, XI (1951); G. Zilbourg, *The Medical Man and the Witch during the Renaissance*, Baltimore, 1935; O. Zockler, *Geschichte der Beziehungen zwischen Theologie und Naturwissenschaft, mit besonderer Rücksicht auf Schöpfungsgeschichte*, Gütersloh, 1877-1879, 2 vols.; V. P. Zubov, *Leonardo da Vinci*, Cambridge, Mass., 1968. Más publicaciones recientes: S. Bradbury, *The Evolution of Microscope*, Oxford, 1967; Sir G. N. Clark, *A History of the Royal College of Physicians*, Oxford, 1964-1966, 2 vols.; W. T. Costello, *The Scholastic Curriculum at Early Seventeenth Century Cambridge*, Cambridge, Mass., 1958; Mark H. Curtis, *Oxford and Cambridge in Transition*, Oxford, 1959; C. Maccagni, *Le Speculazione giovanili «de motu» di Giovanni Bañista Benedetti*, Pisa, 1967; P. Mathias (ed.), *Science and Society (1600-1900)*, en prensa; R. K. Merton, *Science, Technology and Society in Seventeenth Century England*, reimpresión, Nueva York y Londres, 1971; W. K. E. Middleton, *The History of Barometer*, Baltimore, 1964; *A History of Thermometer and its Uses in Meteorology*, Baltimore, Md., 1967; O. D. O'Malley, *Andreas Vesalius of Brussels, 1514-1564*, Berkeley y Los Angeles, 1946; M. J. S. Rudwick, *The Meaning of Fossils*, Londres, 1972; G. Scherz (ed.), *Steno and Brain*

Research in the Seventeenth Century (Analecta Medico-Historica, III, Oxford, 1968) (ed.); Steno as Geologist, Odense, 1971; Nicolaus Steno, Leciure of the Anatomy of the Brain, introd. por G. Scherz, Copenhagen, 1965; Geological Papers, ed. G. Scherz, trad. por A. J. Pollock, Odense, 1969.

FIN

¹ Vide Marshall Clagett, *Archimedes in the Middles Ages*, I, Madison, Wisc., 1964.

² Vide A. C. Crombie. *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science 1100-1700*, Oxford, 1971, 3.a edición, revisada, p. 55.

³ Sobre la historia de estos términos y del método «resolutivo-compositivo», vide Crombie, *Robert Grosseteste and the Originis of the Experimental Science 1100-1700*, especialmente las pp. 27-29, 52-90, 193-194, 297-318. Sobre el método de la dialéctica de Platón, e. g. en la *República*, libro 6; vide L. Brunschvicg, *Les étapes de la philosophie mathématique*, 3.^a edic., París, 1947, pp. 49 y ss. Otros estudios griegos importantes del método son los de Galeno, *Techne* o *Ars medica*, ed. C. G. Kühn (*Medicorum Graecorum Opera*), Leipzig, 1821, vol. I; y de Pappo de Alejandría, *Collectio Mathematica*, VII, 1-3, trad. inglesa de T. L. Heath, *History of Greek Mathematics*, Cambridge, 1921, vol. II, pp. 400-401. Cf. también Hipócrates, *Techne (El Arte)*, traducción inglesa de W. H. S. Jones (Loeb Classical Library), Londres y Cambridge, Massachusetts, 1923; y de Arquímedes, *Método*, trad. inglesa de T. L. Heath, Cambridge, 1912.

⁴ De hecho, las colas de los cometas son repelidas por el Sol, aunque los ángulos diferirán de los de la luz reflejada. Son buenos ejemplos del mismo tipo de análisis empírico los estudios de Aristóteles sobre los cometas en los *Meteoros* (libro 1, capítulo 6) y su refutación de la pangénesis en el *De Generatione Animalium* (libro 1, capítulos 17, 18).

⁵ El silogismo es una forma de razonamiento en el que, de dos proposiciones dadas, las premisas, con un término medio o común, se deduce una tercera proposición, la conclusión, en la cual se unen los términos no comunes. Por ejemplo, de la premisa mayor «cualquier cosa a la que intercalan un cuerpo opaco entre ella y la fuente de la luz, pierde su luz», y la menor «la Luna tiene un cuerpo opaco interpuesto entre ella y su fuente de luz», se sigue la conclusión «por tanto, la Luna pierde su luz», esto es, sufre un eclipse. De este modo, un eclipse de luna es explicado como un caso de un principio mas general.

⁶ I. e., si la enfermedad provoca el exceso de una cualidad tal como el calor, la medicina debería provocar la disminución de esa cualidad, es decir, tener un efecto refrigerador. (Cf. vol. I, pp. 152 y ss.)

⁷ El desarrollo de la teoría atomista en el Mundo Antiguo después de la época de Platón y Aristóteles (para la Historia hasta Platón, vide la nota en el vol. I, p. 40) fue en gran parte obra de Epicuro (340-270 a. C.), Estratón de Lampsaco (floreció hacia 288 a. C.), Filón de Bizancio (siglo 11 a. C.) y Herón de Alejandría (siglo 1 a. C.). La teoría de Epicuro fue expuesta por Lucrecio en su poema *De Rerum Natura*. Epicuro hizo dos cambios en la teoría de Demócrito. Sostenía, primero, que los átomos caían perpendicularmente en el espacio vacío debido a su peso y, segundo, que las interacciones entre ellos que producía la formación de los cuerpos tenía lugar como un resultado de «desvíos» que se producían por azar y provocaban colisiones. Supuso un número limitado de formas, pero un número infinito de átomos de cada forma. Los diferentes tipos de átomos tenían peso distinto, pero todos caían a la misma velocidad. Epicuro estableció también un principio que había sido defendido por algunos atomistas anteriores, a saber, que todos los cuerpos de cualquier peso caerían en el vacío a la misma velocidad. Las

diferencias de velocidad de cuerpos determinados en un medio dado, *e. g.*, el aire, se debían a diferencias en la proporción de la resistencia al peso. En el momento de la colisión, los átomos se entrelazaban por medio de pequeñas ramas o antenas; solamente los átomos del alma eran esféricos. Para hacer frente a la objeción de Aristóteles basada en el cambio de propiedades en un compuesto, supuso que un «cuerpo compuesto» formado por la asociación de átomos podía adquirir nuevas potencias no poseídas por los átomos individuales. El número infinito de átomos producía un número infinito de universos en el espacio infinito. Parece que el tratado de Estratón *Sobre el vacío* fue la base de la introducción a la *Pneumática* de Herón. Estratón combinó el atomismo con concepciones aristotélicas y adoptó una perspectiva empírica sobre la existencia del vacío, que utilizaban para explicar las diferencias de densidad entre los diferentes cuerpos. En esto fue seguido por Filón en su *De Ingeniis Spiritualibus* (que no fue muy conocido en la Edad Media) y por Herón, que negó la existencia de un vacío extenso continuo, pero que utilizó los vacíos intersticiales entre las partículas de los cuerpos para explicar la compresibilidad del aire, la difusión del vino en el agua y fenómenos similares. Estos autores llevaron también a cabo experimentos para demostrar la imposibilidad de un vacío extenso. Aristóteles había probado que el aire tenía cuerpo mostrando que una vasija debía ser vaciada de aire antes de que pudiera ser llenada de agua. Filón y Herón realizaron el experimento, también descrito por Simplicio, mostrando que en un reloj de agua, o clepsidra, el agua no podía *dejar* la vasija a menos que hubiera un medio de entrada para el aire. Filón describió también otros dos experimentos que probaban la misma conclusión. Fijó un tubo a un globo que contenía aire y hundió el extremo del tubo bajo el agua, y mostró que cuando se calentaba el globo, el aire era expelido, y cuando se enfriaba, el aire se contraía y arrastraba el agua detrás de él por el tubo. El aire y el agua permanecían en contacto, impidiendo el vacío. También mostró que cuando se encendía una bujía en una vasija invertida sobre el agua, el agua se elevaba a medida que el aire se consumía. Aparte de estos y otros autores alejandrinos, como el médico Erasístrato y miembros de la secta metódica, el atomismo no fue considerado favorablemente en la Antigüedad. Encontró la oposición de los estoicos, aunque éstos creyeron en la imposibilidad del vacío dentro del universo y en un vacío infinito más allá de sus límites; y encontró también la oposición de un cierto número de autores como Cicerón, Séneca, Galeno y San Agustín. Pero el atomismo fue estudiado brevemente por Isidoro de Sevilla, Beda, Guillermo de Conches y por varios autores árabes y judíos, como Rhazes (muerto hacia 924) y Maimónides (1135-1204).

⁸ De hecho, tanto el magnetismo como la gravedad dan a los cuerpos una aceleración inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

⁹ Vide E. A. Moody, «Galileo and Avempace», *Journal of the History of Ideas*, 1951, vol. XII.

¹⁰ Traducido del texto latino publicado por Anneliese Maier, *Zwei Grundprobleme der Scholastischen Naturphilosophie*, Roma, 1951, pp. 157-158.

¹¹ Según el principio de inercia, un cuerpo permanecerá en un estado de reposo o de movimiento con velocidad uniforme en línea recta, a menos que sea afectado por una fuerza. Este concepto fue la base de la mecánica de Newton. Para Newton, el movimiento rectilíneo uniforme era una condición o estado del cuerpo equivalente al reposo y no se requería ninguna fuerza para mantener ese estado. El principio de inercia era, pues, directamente contrario al principio de Aristóteles, según el cual el movimiento no era un estado, sino un proceso, y un cuerpo en movimiento dejaría de moverse, a menos que una fuerza actuara continuamente sobre él.

¹² La *materia prima* de Buridán tenía, como la del *Timeo*, extensión con dimensiones. La cantidad de materia era, pues, proporcional al volumen y densidad. Duhem (*Études sur Léonard de Vinci*, 3.^a serie, 1913, pp. 46-49) sugiere que alcanzó la noción de densidad por medio de la de peso específico al que era proporcional. El pseudoarquímedes griego *Liber Archimedis de Ponderibus* definía el peso específico y mostraba cómo comparar los pesos específicos de diferente cuerpos por medio de la balanza hidrostática o aerómetro. Esta obra fue conocida en los siglos XIII y XIV.

¹³ Traducido del latín publicado por Anneliese Maier, *Zwei Grundprobleme der Scholastischen*

Naturphilosophie, Roma, 1951, pp. 211-212; los pasajes de arriba están traducidos de las pp. 213-214, 223.

¹⁴ Descartes, al contrario, en la *Dioptrique*, explicaba la reflexión y la refracción de la luz por analogía con el mecanismo de una pelota de tenis. Cf. *infra*, pp. 113, 226.

¹⁵ Oresme, como más tarde Copérnico, escribió también un tratado muy inteligente sobre la moneda: *vide* De Moneta of Nicholas Oresme and English Mint Documents, trad. C. Johnson, Londres y Edimburgo, 1956.

¹⁶ Esto podría parecer incompatible con la división en tres de la trayectoria de un proyectil; *vide supra*, pp. 73-74.

¹⁷ Vulgata, salmo 92, «Cimentó el orbe: no se conmovirá.» (Versión autorizada, salmo 93.)

¹⁸ «*Uno modo agit, quicquid occurrat, sive sit sensus, sive sit aliud, sive animatum, sive inanimatum. Sed propter diversitatem patientis diversificantur effectus.*» (Ed. L. Baur, *Beitrag zur Gerchichie der Pbilosophie des Mittelalters*, 1912, vol. IX, p. 60.)

¹⁹ Debo al doctor J. A. Weisheipl la siguiente nota que distingue a este Ricardo Swineshead de dos contemporáneos, John y Roger, que también llevan el topónimo de Swineshead. Pudiera ser que John, miembro también del Merton College (hacia 1343-1355), se convirtiera en abogado, pero no se conocen obras suyas. Roger escribió el tratado *De Motibus Naturalibus*, «*datus Oxonie ad utilitatem studencium*» (Erfurt MS Amplon, F. 135, f. 47), y probablemente el conocido manual de Lógica *De Insolubilibus et Obligationibus* antes de 1340; no se conoce nada sobre él, pero pudiera ser que se convirtiera en monje benedictino de Glastonbury y maestro en Sagrada Teología, el subidis Swynshed, proles Glastoniae del poema de Ricardo Tryvytlam en *Collectanea* (vol. 3, ed. M. Burrows). La fecha de su muerte se da como la de 1365 en el MS Arundel 12, f. 80, del British Museum.

²⁰ MS Peterhouse 272, Cambridge; MS Merton 306, Oxford; ambos del siglo XIV.

²¹ La prueba se da en el *De Probationibus Condusionum* (Veneda, 1494), atribuido a Heytesbury, pero la autenticidad de esta obra no está a salvo de objeciones. La prueba de Swineshead aparece en el *Liber Calculationum*, y la de Dumbleton, en la *Summa*; ambas fueron escritas con certeza después de las *Regulae* de Heytesbury.

²² Traducido del latín publicado por H. Wieleitner, *Bibliotheca Mathe- matica*, 3.^a serie, 1914, vol. XIV, pp. 230-231.

²³ Algunos autores han supuesto que Alberto de Sajonia propuso la ley correcta de la caída como una alternativa posible, pero su lenguaje técnico no permite esa interpretación. Vide M. Qagett, *Iris*, 1953, vol. XLIV, p. 401.

²⁴ Otro de los aspectos de la caída de los cuerpos, el que la aceleración es la misma para todos los cuerpos de cualquier sustancia, fue captada enteramente por primera vez por Galileo.

²⁵ Cusa, *The Idiot in Four Books*, Londres, 1650.

²⁶ El principio de Arquímedes afirma que cuando un cuerpo flota, su peso es igual al peso del líquido desplazado, y cuando se hunde, su peso disminuye en esa proporción.

²⁷ Francis Bacon llamó a esto el método de los «Grados de Comparación»; cf. *infra*, p. 258.

²⁸ Galileo parece haber pensado que la Ciencia avanzaba por una serie de alternativas, cada una de las cuales era decidida por un experimento crucial.

²⁹ En el siglo XIV se estableció el principio, que surgía del problema de la condensación y rarefacción tal como lo estudió Aristóteles, de que la *quantitas materiae* de un cuerpo permanecía constante en todos los cambios. El término de *quantitas materiae* fue utilizado por Gil de Roma. Siguiendo la obra de Roger Swineshead (que también la llamó *massa elementaris*), Heytesbury y Dumbleton, Ricardo Swineshead desarrolló un concepto claro de la mensurabilidad matemática de la *quantitas materiae* por la razón de la densidad y el volumen. Con Buridán se convirtió en un concepto dinámico (*vide supra*, p. 69, nota 12). Pero el peso (*pondus*) permaneció siendo para los escolásticos una propiedad únicamente de los cuerpos «pesados», y de ese modo no fueron nunca capaces de concebir el peso como proporcional a la masa, como hizo Newton. Debo de nuevo al doctor Weisheipl parte de esta información: cf. *supra*, p. 86, nota 19.

³⁰ «Con el fin de probar por la demostración todo lo que deduciré, no acepto en Física ningún

principio que no sea aceptado también en matemáticas; estos principios son suficientes porque todos los fenómenos de la naturaleza pueden ser explicados por medio de ellos.» *Principia Philosophiae*, 2, 64. Cuando se utilizaba la Matemática para explicar los fenómenos físicos, la exigencia necesaria era que «todas las cosas que se deduzcan concuerden perfectamente con la experiencia». *Princ. Philos.*, 3, 46. La posición de Descartes en la tradición platónico-agustiniana era, pues, semejante a la de Grossetesta o Roger Bacon.

³¹ En la cruz céltica medieval se observa un simbolismo análogo, dispuesto diferentemente.

³² *Vide* C. G. Jung y W. Pauli, *The Interpretation of Nature and the Psyche*, Londres, 1955.

³³ La carta de Galileo fue escrita en 1612 y publicada en 1613. Fue Kepler quien introdujo el término inercia en la Física, pero lo utilizó para significar una resistencia intrínseca al movimiento y una inclinación al reposo en el movimiento.

³⁴ Cf. Gerald Holton, «Johanes Kepler's universe: its physics and mathematics», *American Journal of Physics*, 1956, vol. XXIV, pp. 340-351; A. Koyré, «L'oeuvre astronomique de Kepler», *XVII^{ème} Siècle*, 1956, núm. 30.

³⁵ La órbita fue verificada experimentalmente con el lanzamiento del Sputnik el 4 de octubre de 1957.

³⁶ Y viceversa; *vide infra*, p. 188, nota 39.

³⁷ Cf. Francis Bacon, *Advancement of Learning* (1605): «Sin embargo, para quienes buscan la verdad, y no la magistralidad, no puede parecer sino una cuestión de gran provecho el ver ante ellos las diferentes opiniones respecto de los fundamentos de la naturaleza; no por una verdad exacta que pudiera ser esperada de estas teorías; porque así como los mismos fenómenos de la Astronomía son satisfechos por la Astronomía recibida del movimiento diario, y los movimientos propios de los planetas, con sus excéntricas y epiciclos, y de la misma forma por la teoría de Copérnico, que supuso que la Tierra se movía (y los cálculos concuerdan indiferentemente con ambas), así de la misma manera la faz ordinaria y la vista de la experiencia es confirmada muchas veces por teorías y filosofías, mientras que para encontrar la verdad real se requiere otro modo de rigor y de atención.» Añadía; «Di otro tanto de la opinión de Copérnico respecto de la rotación de la Tierra, la cual la misma Astronomía no puede corregir, porque no repugna a ningún fenómeno; sin embargo, la filosofía de la naturaleza puede corregirla.»

³⁸ Parece que Bruno no fue acusado de su defensa del sistema copernicano. Según Lynn Thorndike, *History of Magic and Experimental Science*, vol. VI, p. 247; «Excepto que el 24 de marzo de 1597 fue conminado para que abandonase esas opiniones tuyas tan extrañas como la pluralidad e infinidad de mundos, lo que contó más contra él fue su apostasía de su orden, su larga asociación con heréticos y su actitud cuestionable respecto de la Encarnación y la Trinidad.»

³⁹ Muchos científicos, incluidos Descartes y Newton, han compartido el ideal **de** intentar hacer una ciencia natural lo más próxima posible a las matemáticas **en** este aspecto; cf. *infra*, pp. 270, 179.

⁴⁰ Cf. la carta de Leibniz al Abbé Conti, noviembre o diciembre de 1715, refiriéndose a la teología natural de Newton, sobre la cual se había puesto a discutir con Samuel Clarke: «Y porqué no conocemos todavía perfectamente y en detalle cómo es producida la gravedad o la fuerza elástica o la fuerza magnética, esto no nos da ningún derecho para hacer de ellas cualidades ocultas escolásticas; pero nos da todavía menos derecho para poner límites a la sabiduría y poder de Dios y a atribuirle un sensorium y tales cosas.» (Recuérdi de diverses pièces sur la Philosophie, la Religion Naturelle, L'Histoire, les Mathématiques, etc. par Mrs. LeibnitzClarke, Newton & autres auteurs célèbres, ed. Des Maiseaux, Amsterdam, 1720, II, 9.) «La credulidad es dañosa de la misma -forma que la incredulidad; la tarea de un hombre prudente es, por tanto, ensayar todas las cosas, sostener fuertemente lo que es aprobado, no limitar nunca el poder de Dios, no asignar límites a la naturaleza.» (Boerhaave, *A New Method of Chemistry*, Londres, 1741.)

⁴¹ Cf. Karl R. Popper, «Three views on human knowledge», in *Contemporary British Philosophy: Personal Statements*, 3ª serie, Londres, 1956.

⁴² La interpretación aceptada en el siglo XIV era que Galeno había defendido que la sangre

pasaba del lado derecho del corazón al izquierdo, a través de esos poros. Esta era también la opinión de Avicena (cf. Canon medicinae, 3, 11, 1, 1, Venecia, I, 669-670), aunque las propias obras de Galeno parecen dejar abierta la posibilidad de que parte de sangre pasara a través de los pulmones. (Vide vol. I, pp. 152-153.) El mismo Harvey puede haber interpretado a Galeno en este último sentido, aunque sus observaciones son equívocas: «Desde Galeno, ese gran príncipe de los médicos, parece claro que la sangre pasa por los pulmones desde la vena arterial [arteria pulmonar] a las diminutas ramas de la arteria venosa [vena pulmonar], impelida a esto a la vez por el latir del corazón y por los movimientos de los pulmones y el tórax.» (De Motu Cordis, capítulo 7.) Al menos, Harvey pagó a Galeno el tributo de haber aportado evidencia clara de la circulación pulmonar por medio de su descripción de las válvulas cardíacas y de la anastomosis de las arterias y venas en los pulmones; pero ridiculizó la opinión de que una corriente de «residuos fuliginosos» pudiera refluir por las válvulas nùtrales del ventrículo izquierdo a los pulmones.

⁴³ Una traducción latina hecha por Andrea Alpago del gran comentario de Ibn al-Nafis al Canon de Avicena fue publicada en Venecia en 1547, pero curiosamente omitía la sección de la circulación pulmonar.

⁴⁴ Después que el francés Jean Tarde visitó a Galileo en 1614, decía: «Galileo me dijo que el tubo de un telescopio par^ observar las estrellas no tiene más de dos pies de largo; pero para ver bien los objetos que están próximos, y que por razón de su pequeño tamaño son difícilmente visibles a simple vista, el tubo debe ser dos o tres veces más largo. Me dijo que con este largo tubo había visto moscas que parecían tan grandes como ovejas, están todas cubiertas de pelo y tienen uñas muy puntiagudas, por medio de las cuales se mantienen derechas y andan por el vidrio, aunque estén cabeza abajo.» Galileo, *Opere*, ed. Naz., vol. 19, p. 589.

⁴⁵ J. P. Richter, *The Literary Works of Leonardo da Vinci*, 2ª edición, Oxford, 1939, vol. II, p. 175.

⁴⁶ Richter, vol. II, pp. 146-147.

⁴⁷ Cf. M. Boas, «*The stablishment of the mechanical philosophy*», *Osiris*, 1952, vol. X.

⁴⁸ Boyle Papers, vol. XXXVII. Miscelánea en la Biblioteca de la Royal Society de Londres. Hay varias versiones con variaciones menores; vide M. Boas, «La méthode scientifique de Robert Boyle», *Revue d'Histoire des Sciences*, 1956, vol. IX; R. S. Westfall, «Unpublished Boyle papers relating to scientific method», *Annals of Science*, 1956, vol. XII.

⁴⁹ Esto es, hipótesis en el sentido de ficciones explícitas.

⁵⁰ Este pasaje ocupa una posición sugestiva en el desarrollo paralelo de las concepciones de la naturaleza y del pensamiento. Por b menos desde Francis Bacon, los filósofos y los científicos han estado reduciendo la naturaleza a materia en movimiento y, un poco más tarde, el pensamiento a la asociación de impresiones e ideas. El comportamiento tanto de los cuerpos como de las mentes estaba determinado por los eventos externos. Las otras precríticas y críticas de Kant indican unas y otras una preocupación por el problema del organismo-mecanismo. En la «Crítica del juicio teleológico*» (parte 2 de la *Crítica del juicio*, 1790), una brillante contribución a la filosofía de la Biología, destacó el punto de la imposibilidad en principio de explicar los hechos de la unidad orgánica en términos mecanicistas, incluso aunque todas las partes de la unidad pudieran ser analizadas mecanicistamente. Concluía así que un organismo vivo no era un mero agregado de constitutivos mecánicos sin relación, sino un sistema de partes relacionadas funcionalmente unidas unas a otras por un principio de unidad. Análogamente, en la *Crítica de la razón pura* daba a la mente un principio por el que ella determinaba las conexiones de las impresiones e ideas según su propio plan. En ambos casos, el acento se colocaba en el papel activamente controlador del principio intrínseco, y en esto Kant reintroducía algo parecido a la materia y forma de Aristóteles, en oposición a la filosofía mecanicista del siglo XVII.

⁵¹ Véanse sus signos en las págs. IBS 157.