

Reseña

La naturaleza es simple y, por eso mismo, de una gran belleza, afirma Richard Feynman, Premio Nobel de Física en 1965. Belleza y sencillez es también lo que el lector encontrará en estas páginas insuperables en las que Feynman aborda aspectos fundamentales de la física: desde la ley de la gravedad y los grandes descubrimientos de Newton, Maxwell y Einstein, hasta nociones tan sustanciales como el principio subyacente de conservación y simetría, el carácter irreversible del tiempo o el predominio de la probabilidad e incertidumbre en la mecánica cuántica.

Todo ello hace de El Carácter De La Ley Física una introducción entusiasta y amena no sólo a las principales leyes físicas que rigen el universo, sino a las claves de todo quehacer científico. Los siete capítulos de El Carácter De La Ley Física recogen las legendarias «Messenger Lectures» pronunciadas por Feynman en la Universidad de Cornell en noviembre de 1964, un año antes de recibir el Nobel. Se pronunciaron en una sala abarrotada de estudiantes, y quedaron registradas por la BBC de Londres, lo que sirvió de base para la preparación de este volumen, un clásico de la ciencia.

Índice

1. [La ley de la gravedad, un ejemplo de ley física](#)
2. [La relación de las matemáticas con la física](#)
3. [Los grandes principios de conservación](#)
4. [Simetría y ley física](#)
5. [La distinción entre pasado y futuro](#)
6. [Probabilidad e incertidumbre: la visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica](#)
7. [En busca de nuevas leyes](#)

Capítulo 1

La ley de la gravedad, un ejemplo de ley física

Es bien curioso, pero en las pocas ocasiones en que he sido requerido para tocar el bongo en público, al presentador nunca se le ocurrió mencionar que también me dedico a la física teórica. Pienso que esto puede deberse a que respetamos más las artes que las ciencias. Los artistas del Renacimiento decían que la principal preocupación del hombre debía ser el hombre, pero en el mundo hay otras cosas interesantes. Incluso a los artistas les interesan las puestas de sol y las olas del mar y el curso de las estrellas en el cielo. Así pues, está justificado hablar de otras cosas de vez en cuando, si miramos a otro nivel, a un nivel, por así decirlo, de mayor placer estético. Pero hay también ritmos y formas en los fenómenos naturales que no son aparentes a simple vista, sino sólo mediante la lupa del análisis. Estos ritmos y formas son eso que llamamos leyes físicas. En esta serie de conferencias quiero discutir acerca de las características genéricas de estas leyes físicas. Nos situaremos, por lo tanto, a otro nivel, a un nivel de mayor generalidad que el de las propias leyes. En realidad, de lo que se trata es de la naturaleza tal como se la contempla tras un análisis detallado, aunque quiero hablar primordialmente de las cualidades más generales de la naturaleza.

Lo que ocurre es que la propia generalidad del tema hace que tienda a derivar demasiado hacia la filosofía, y cuando se generaliza tanto todo el mundo cree que lo ha comprendido, y que se trata de algo

profundísimo desde el punto de vista filosófico. Yo quisiera ser bastante más concreto y aspiro a ser entendido de una manera franca y no vaga. Por ello, en vez de hablar de generalidades, en esta primera conferencia voy a intentar presentar un ejemplo de ley física para que todos ustedes tengan claro el tipo de cosas a las que voy a referirme. De esta manera, además, podré echar mano de este ejemplo una y otra vez a modo de ilustración y para dar cuerpo a algo que de otra forma resultaría demasiado abstracto. He elegido como ejemplo concreto de ley física la teoría de la gravedad y los fenómenos gravitatorios. No la he elegido por ninguna razón especial. Fue una de las primeras grandes leyes que se descubrieron y tiene una historia interesante. Alguno de ustedes quizás esté pensando: «¿Pero no es una antigualla? Me gustaría que me hablaran de algo más moderno». Más reciente quizá, pero dudo que más moderno. La ciencia moderna pertenece a la misma tradición que la ley de la gravedad. La diferencia es sólo cronológica. Así pues, no lamento en absoluto hablar de la ley de la gravedad, porque al describir su historia y sus métodos, el carácter de su descubrimiento, sus características propias, estoy siendo completamente moderno.

De esta ley se ha dicho que es «la mayor generalización lograda por la mente humana», aunque ya puede deducirse de mi introducción que no me interesa tanto la mente humana como la maravilla de una naturaleza que es capaz de obedecer una ley tan simple y tan elegante como la ley de la gravedad. En consecuencia no me voy a

concentrar en lo listos que somos por haber descubierto todo esto, sino en lo lista que es la naturaleza al obedecer a la ley.

La ley de la gravedad afirma que dos cuerpos ejercen una fuerza recíproca que varía inversamente con el cuadrado de la distancia que los separa y directamente con el producto de sus masas. Matemáticamente, la ley puede expresarse mediante la fórmula:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

una constante multiplicada por el producto de ambas masas, dividido por el cuadrado de la distancia. Si a esto añado el comentario de que un cuerpo responde a una fuerza acelerándose, es decir, cambiando su velocidad cada segundo en relación inversa a su masa, o que el cambio de velocidad es tanto mayor cuanto menor es su masa, entonces habré dicho todo lo que hay que decir sobre la ley de la gravedad.

Todo lo demás es una consecuencia matemática de estas dos cosas. Ya sé que no todos ustedes son matemáticos y que no pueden captar de inmediato todas las consecuencias de estas dos observaciones. Por ello, lo que me gustaría hacer a continuación es contarles brevemente cómo se descubrió, cuáles son algunas de sus consecuencias, qué impacto tuvo su descubrimiento sobre la historia de la ciencia, qué clase de misterios entraña esta ley, hablar un poco de los perfeccionamientos añadidos por Einstein y posiblemente de su relación con las demás leyes de la física.

Su historia, brevemente, es ésta. En la antigüedad se descubrió por primera vez el movimiento aparente de los planetas en el cielo y se llegó a la conclusión de que todos ellos, incluida la Tierra, giraban alrededor del Sol. Esto mismo fue redescubierto por Copérnico después de que la gente lo hubiera olvidado. La pregunta que siguió fue: ¿cómo se mueven exactamente los planetas alrededor del Sol, es decir, con qué tipo de movimiento? ¿Ocupa el Sol el centro de una circunferencia o bien trazan los planetas otro tipo de curva? ¿A qué velocidad se mueven?, etc. Las respuestas a estas preguntas tardaron más en llegar. La época posterior a Copérnico fue un periodo de grandes debates sobre si la Tierra se hallaba en el centro del universo o también giraba alrededor del Sol junto a los otros planetas. Fue entonces cuando a un hombre llamado Tycho Brahe¹ se le ocurrió que quizá fuese una buena idea hacer observaciones muy precisas de la posición de los planetas en el cielo para así distinguir unas teorías de otras. Ésta es justamente la base de la ciencia moderna y el principio del verdadero conocimiento de la naturaleza: la idea de fijarse en una cosa, anotar los detalles y confiar en que esta clase de información pueda contener la clave para distinguir una interpretación teórica de otra. Con esta idea en mente, Tycho, que era un hombre rico, habilitó grandes circunferencias de bronce y varios puestos especiales de observación en una isla que poseía cerca de Copenhague y se dedicó a anotar la posición de los planetas noche tras noche. Sólo a base de trabajar duro puede descubrirse algo.

¹ Tycho Brahe, 1546-1601, astrónomo danés.

Una vez recopilados los datos, éstos llegaron a manos de Kepler,² quien intentó analizar el tipo de trayectoria que describen los planetas alrededor del Sol. Para ello empleó el método de prueba y error. En cierta ocasión pensó que había dado con la respuesta. La idea era que los planetas trazaban circunferencias con el Sol desplazado del centro; pero Kepler vio que un planeta (creo que era Marte) estaba fuera de sitio por unos ocho minutos de arco y decidió que la diferencia era demasiado grande para pensar que Tycho Brahe se había equivocado, por lo que no podía dar su respuesta por buena. Así pues, gracias a la precisión de las mediciones de Tycho Brahe, Kepler continuó probando para llegar finalmente a descubrir tres cosas.

Lo primero que descubrió es que los planetas describían elipses alrededor del Sol, con éste en uno de los focos. Éstas son curvas conocidas de todos los dibujantes porque son como un círculo aplastado.

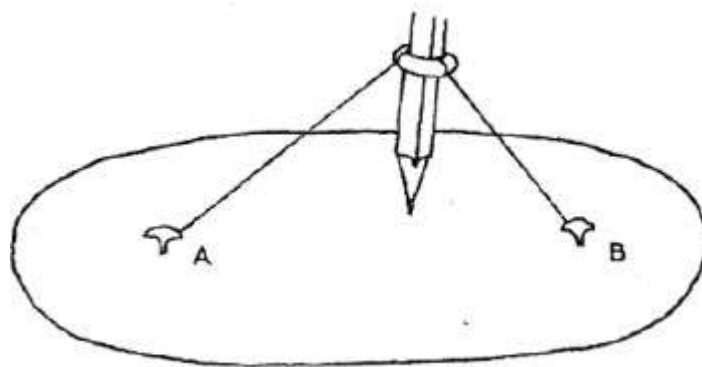


Figura 1

² Johann Kepler, 1571-1630, astrónomo y matemático alemán, ayudante de Brahe.

A los niños también les resultan familiares, porque alguna vez les han contado que si se ata un anillo a una cuerda fija por sus extremos y se coloca un lápiz en el anillo, se puede dibujar una elipse (figura 1).

Los dos puntos A y B son los focos. La órbita de un planeta es una elipse con el Sol en uno de los focos. La pregunta siguiente es: ¿de qué manera describe el planeta la elipse? ¿Va más rápido cerca del Sol? ¿Va más despacio lejos del Sol? Kepler también dio con la respuesta a esta cuestión (figura 2).

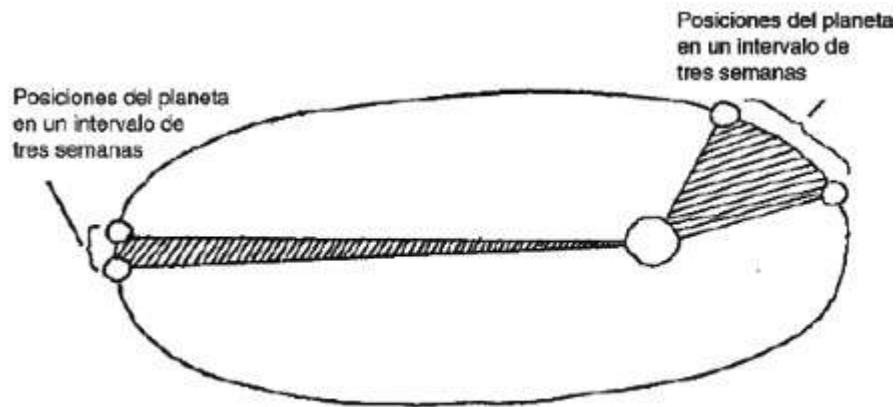


Figura 2

Si se fija primero la posición de un planeta en dos momentos distintos separados por un lapso de tiempo determinado (pongamos tres semanas) y posteriormente, en otra parte de la órbita, se fijan otras dos posiciones del planeta separadas de nuevo por un lapso de tres semanas y se trazan las líneas que unen el Sol con el planeta (radios vectores, en lenguaje técnico), el área definida por el arco de la órbita planetaria, correspondiente al recorrido del planeta en un lapso de tres semanas, y los dos radios es la misma en

cualquier parte de la órbita. En consecuencia, el planeta tiene que ir más deprisa cuando está próximo al Sol y más despacio cuando está lejos (de lo contrario las dos áreas no serían idénticas).

Algunos años más tarde, Kepler descubrió una tercera regla relativa al tiempo que tarda un planeta en dar una vuelta completa alrededor del Sol. Este tiempo se relaciona con el tamaño de la órbita, entendido como la longitud del diámetro mayor de la elipse, y varía según la raíz cuadrada del cubo del tamaño de la órbita. Las tres leyes obtenidas por Kepler se resumen diciendo que

la órbita tiene forma de elipse, que áreas iguales se cubren en tiempos iguales y que el tiempo que tarda un planeta en dar una vuelta entera es proporcional al tamaño de la órbita elevado a tres medios.

Estas tres leyes de Kepler ofrecen una descripción completa del movimiento de los planetas alrededor del Sol.

La siguiente pregunta fue: ¿qué es lo que hace que los planetas se muevan alrededor del Sol? Una de las respuestas que se dieron en tiempos de Kepler fue que detrás de los planetas había ángeles que los impulsaban batiendo sus alas. Como veremos, esta respuesta no está tan lejos de la verdad. La única diferencia es que los ángeles están sentados en una dirección diferente y sus alas empujan hacia dentro.

Mientras tanto, Galileo estaba investigando las leyes del movimiento de los objetos terrestres. De su estudio y de cierto número de experimentos encaminados a entender, por ejemplo, de qué manera

rodaba una bola sobre un plano inclinado o cómo se movía el péndulo, Galileo descubrió un gran principio, el llamado principio de inercia, que establece lo siguiente: si nada actúa sobre un objeto y éste avanza a una velocidad determinada en línea recta, esta velocidad se mantendrá para siempre y el objeto seguirá describiendo la misma línea recta. Por increíble que pueda parecer si alguna vez hemos tratado de conseguir que una bola no pare de rodar, en el caso de que esta idealización fuera correcta y nada, ni siquiera la fricción del suelo, influyera sobre ella, entonces la bola conservaría su velocidad para siempre.

El siguiente descubrimiento lo hizo Newton, quien consideró otra cuestión: «Si el objeto no va en línea recta, ¿qué pasa *entonces?*». La respuesta que dio es que se necesita una fuerza para modificar de alguna manera la velocidad. Por ejemplo, si se empuja la bola en el sentido del movimiento, crecerá su velocidad. Si resulta que cambia de dirección, entonces la fuerza debe haberse aplicado lateralmente. La fuerza puede medirse por el producto de dos efectos. ¿Qué cambio experimenta la velocidad en un pequeño intervalo de tiempo? A esto se le llama aceleración, y cuando se multiplica por el coeficiente de inercia de un objeto (es decir, su masa) se obtiene la fuerza. Y la fuerza es medible. Por ejemplo, si tenemos una piedra atada a un cordel y la hacemos girar alrededor nuestro, descubrimos que hay que tirar del cordel porque, aunque la velocidad de la piedra no cambia mientras gira sobre nuestra cabeza, su dirección sí que lo hace. Por lo tanto, debe existir una fuerza que tire constantemente hacia dentro, y esta fuerza es

proporcional a la masa. De manera que si cogemos dos objetos distintos y los hacemos girar uno tras otro alrededor nuestro a la misma velocidad, y medimos la fuerza de cada uno de ellos, resultará que una fuerza será tanto mayor que la otra cuanto mayor sea la masa del primer objeto respecto de la del segundo. Ésta es una manera de medir las masas a partir de la fuerza necesaria para cambiar la velocidad. De ahí Newton sacó la conclusión de que si un planeta, por poner un ejemplo sencillo, describe un círculo alrededor del Sol, *no es necesaria fuerza alguna para hacer que escape en línea recta, tangencialmente*; de no existir fuerza alguna continuaría en línea recta. Pero no es esto lo que ocurre; el planeta no escapa, sino que se inclina hacia el Sol (figura 3).

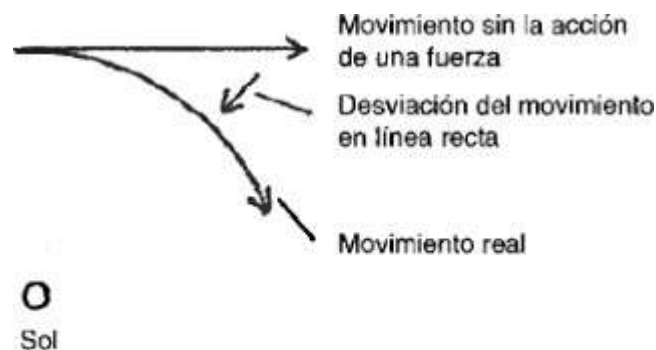


Figura 3

En otras palabras, su velocidad, su movimiento, han sido desviados hacia el Sol. Así, lo que los ángeles tienen que hacer es batir sin parar sus alas en dirección al Sol.

Pero el movimiento en línea recta de un planeta no tiene explicación. La razón por la cual las cosas se mueven en línea recta para siempre no ha sido descubierta. La ley de la inercia no tiene un

origen conocido. Aunque los ángeles no existan, sí existe la continuación del movimiento, pero para conseguir el movimiento de caída hacia abajo hace falta una fuerza. Resultaba claro que el origen de la fuerza estaba en el Sol. De hecho, Newton pudo demostrar que la afirmación de que se cubren áreas iguales en tiempos iguales era una consecuencia directa del simple principio de que todos los cambios de velocidad estaban dirigidos exactamente hacia el Sol, incluso en el caso de órbitas elípticas, y en la próxima conferencia describiré en detalle cómo ocurre esto.

A partir de esta ley, Newton confirmó la idea de que la fuerza se dirige hacia el Sol y, sabiendo cómo varían los periodos de los distintos planetas según su distancia al Sol, le fue posible determinar de qué forma se debilita dicha fuerza al aumentar la distancia. Encontró que la fuerza debe variar en proporción inversa al cuadrado de la distancia.

Hasta ahora Newton no ha dicho nada nuevo, porque se ha limitado a establecer dos cosas que Kepler ya había dicho de otra manera. Una es exactamente equivalente a la afirmación de que la fuerza se dirige hacia el Sol, y la otra es exactamente equivalente a la afirmación de que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Pero la gente había observado a través de telescopios cómo los satélites de Júpiter giraban alrededor de ese planeta, cosa que recordaba el sistema solar, como si los satélites fueran atraídos por Júpiter. La Luna es atraída por la Tierra y gira a su alrededor de la misma manera. Era como si todas las cosas se atrajeran

mutuamente, por lo que no es de extrañar que el enunciado siguiente consistiera en expresar esta observación en términos generales, afirmando que todo objeto atrae a todo objeto. Si esto fuera así, la Tierra tiraría de la Luna de la misma manera que el Sol tira de los planetas.

Pero además se sabe que la Tierra tira de las cosas (todos los aquí presentes están perfectamente sentados en sus asientos a pesar de sus deseos de flotar por los aires). La atracción de la Tierra sobre los objetos era de sobra conocida a través de los fenómenos de la gravedad, y fue idea de Newton pensar que quizá la gravedad que mantenía la Luna en su órbita era la misma gravedad que tiraba de los objetos hacia la Tierra.

Es fácil calcular la distancia que cae la Luna en un segundo, porque conocemos el tamaño de su órbita y sabemos que la Luna tarda un mes en dar una vuelta alrededor de la Tierra. Si calculamos la distancia que recorre en un segundo podemos hallar la medida en que el círculo que describe la Luna en su órbita ha caído por debajo de la línea recta que hubiese seguido si las cosas no fueran como son. La distancia aproximada es de 1,40 mm. Nosotros estamos a unos 6500 km del centro de la Tierra y la Luna está a 390.000 km, de manera que la Luna está alejada del centro de la Tierra unas sesenta veces más que nosotros. Si la ley de la inversa del cuadrado es correcta, un objeto sobre la superficie de la Tierra debería caer en un segundo una distancia de $1,40 \times 3600$ (el cuadrado de 60) porque la misma fuerza, hasta llegar a la Luna, se ha debilitado en 60×60 , según la ley de la inversa del cuadrado. El resultado de

$1,40 \times 3600$ es aproximadamente 5 metros, distancia que, de acuerdo con las mediciones de Galileo, era la recorrida en un segundo por un cuerpo en caída libre sobre la superficie de la Tierra. Esto significaba que Newton estaba en el buen camino y que ya no había vuelta atrás, porque un hecho nuevo, el periodo de la órbita Lunar y su distancia a la Tierra, se acababa de vincular con otro hecho totalmente independiente en principio como es la distancia recorrida en un segundo por un objeto en caída libre sobre la superficie de la Tierra. Ésta fue la asombrosa comprobación de que todo estaba en regla.

Además, Newton pudo hacer un sinfín de predicciones. Calculó la forma que debía tener la órbita si la ley era la de la inversa del cuadrado y descubrió que, efectivamente, tenía que ser una elipse (con lo que puede decirse que obtuvo tres cosas por el precio de dos). Resultó que buen número de fenómenos tenía nuevas explicaciones obvias. Uno de ellos era el de las mareas. Éstas se debían al tirón de la Luna sobre la Tierra y sus aguas. Era una explicación que ya se había considerado antes, pero que entrañaba la dificultad de que si realmente la Luna tirase de las aguas, elevando en consecuencia la altura de la superficie oceánica frente a ella, solamente existiría una marea diaria (figura 4), cuando sabemos que las mareas se dan aproximadamente cada doce horas. Sin embargo, otra escuela llegó a conclusiones diferentes. Su teoría consistía en que era la Tierra la que era atraída por la Luna, dejando atrás sus aguas.

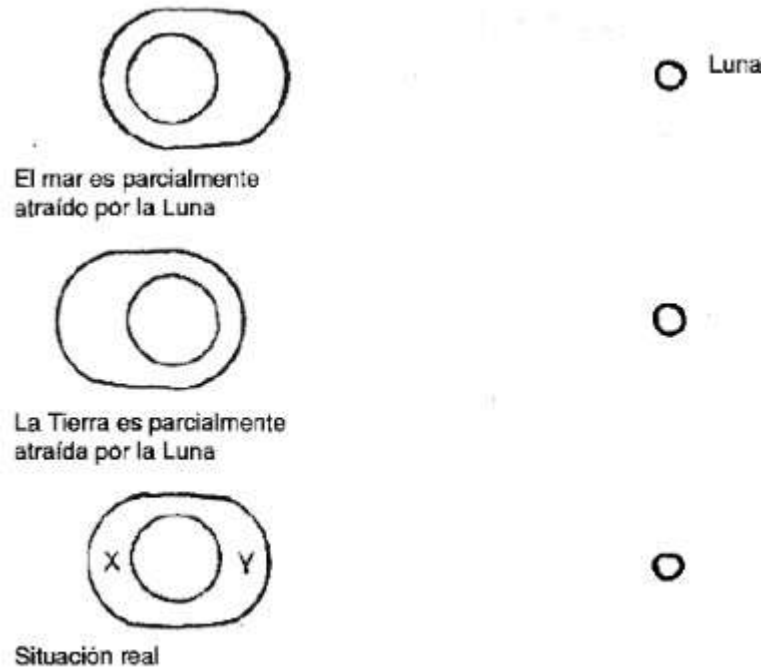


Figura 4

Newton fue realmente el primero en advertir lo que estaba ocurriendo: que la fuerza de la Luna sobre la Tierra y sobre sus aguas es la misma a la misma distancia, y que el agua en *y* está más cerca de la Luna que la rígida Tierra y ésta, a su vez, está más cerca de la Luna que el agua en *x*. En *y* el agua es más atraída por la Luna, pero en *x* lo es menos que la Tierra, y es la combinación de ambos hechos lo que explica las dos mareas diarias. En realidad, la Tierra hace lo mismo que la Luna: gira describiendo un círculo. La fuerza de la Luna sobre la Tierra está equilibrada, pero ¿cómo? Por el hecho de que, así como la Luna describe un círculo para compensar la fuerza de la Tierra, la Tierra también gira en círculo. El centro del círculo está en algún lugar del interior de la Tierra. Ambos cuerpos giran alrededor de un centro común, de manera que para la Tierra las fuerzas están equilibradas, pero el agua en *x* es

menos atraída por la Luna, mientras que en y es más atraída, de manera que sobresale por ambos lados. Sea como sea, se explicaron las mareas junto con el hecho de que haya dos diarias. También se aclararon muchas otras cosas: el hecho de que la Tierra sea redonda, puesto que todo es atraído hacia el centro; el hecho de que no sea exactamente redonda, porque está rotando y la parte exterior se proyecta un poco hacia fuera; el hecho de que el Sol y la Luna sean redondos, etc.

A medida que la ciencia fue avanzando y las mediciones fueron ganando en precisión, la verificación de la Ley de Newton se hizo más rigurosa. Las primeras comprobaciones se hicieron sobre las lunas de Júpiter. Mediante la observación precisa de sus movimientos durante periodos de tiempo largos debía ser posible comprobar que todo ocurría según lo establecido por Newton. Pero resultó no ser así: las lunas de Júpiter se retrasaban unas veces y se adelantaban otras en hasta ocho minutos respecto del tiempo calculado según las leyes de Newton. Se comprobó que las lunas se adelantaban cuando Júpiter se acercaba a la Tierra y se retrasaban en caso contrario, una circunstancia un tanto insólita. Rømer³, cuya confianza en la ley de la gravedad era absoluta, llegó a la interesante conclusión de que la luz tarda cierto tiempo en viajar desde las lunas de Júpiter hasta la Tierra, y que cuando las contemplamos no las estamos viendo en su estado actual, sino tal como eran en el instante anterior correspondiente al tiempo que tardó la luz en alcanzarnos. Cuando Júpiter está más cerca de

³ Ole Rømer, 1644-1710, astrónomo holandés.

nosotros la luz tarda menos tiempo en llegar, y tarda más cuando está más lejos, de manera que Rømer corrigió las observaciones eliminando la diferencia de tiempo y, teniendo en cuenta los adelantos y atrasos, pudo determinar la velocidad de la luz. Ésta fue la primera demostración de que la luz no era un material de propagación instantánea.

Traigo a colación este tema concreto porque sirve para ilustrar el hecho de que, cuando una ley es correcta, sirve para descubrir otras. Si tenemos confianza en una ley, la constatación de que algo no cuadra puede sugerirnos otro fenómeno. De no haber conocido la ley de la gravedad nos habría costado mucho más descubrir la velocidad de la luz, porque no habríamos sabido qué podíamos esperar de los satélites de Júpiter. Este proceso ha dado lugar a una verdadera avalancha de descubrimientos, cada uno de los cuales es un instrumento para hacer otros muchos descubrimientos. Nos estamos refiriendo al comienzo de una avalancha ininterrumpida que se inició hace 400 años y sigue avanzando a gran velocidad.

Más tarde surgió otro problema: en realidad, los planetas no deberían describir elipses perfectas ya que, según las leyes de Newton, los planetas no son sólo atraídos por el Sol, sino que tiran un poco los unos de los otros. Muy poco, es cierto, pero lo suficiente para alterar algo las órbitas planetarias. Júpiter, Saturno y Urano eran grandes planetas ya conocidos, de manera que se efectuaron observaciones y cálculos para comprobar lo poco que diferían los movimientos reales de estos planetas de las elipses perfectas de Kepler. Una vez completados los cálculos, se comprobó que Júpiter

y Saturno se movían según lo esperado, mientras que a Urano le pasaba algo raro.

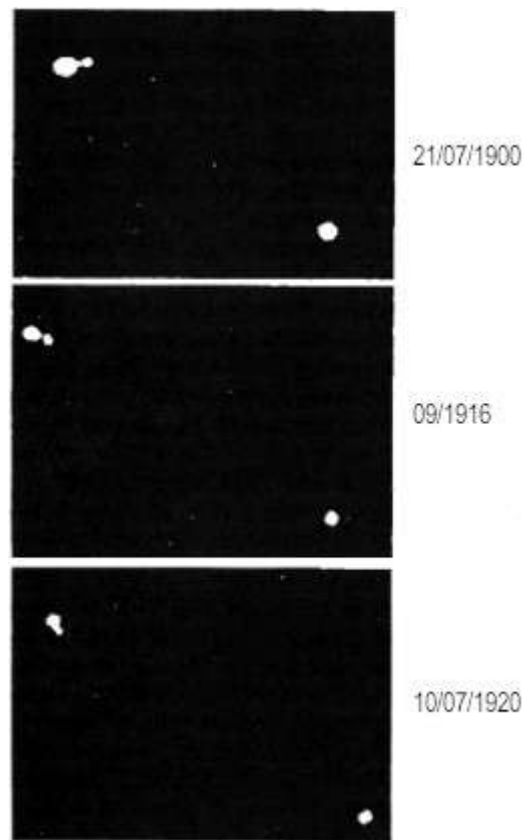
Otra oportunidad para demostrar que las leyes de Newton no eran del todo perfectas. ¡Pero no nos desanimemos! Dos hombres, Adams y Leverrier⁴, que hicieron los mismos cálculos de forma independiente y casi simultánea, atribuyeron los movimientos erráticos de Urano a la presencia de un planeta desconocido y escribieron cartas a sus respectivos observatorios en las que decían: «Enfocad vuestros telescopios hacia allá y encontraréis un planeta». «¡Qué absurdo!», pensaron en uno de los observatorios, «¿cómo nos va a decir dónde encontrar un nuevo planeta un tipo que trabaja sentado en su mesa con papel y lápiz?» El otro observatorio era más..., en fin, tenía una administración diferente, ¡y descubrieron Neptuno!

En fecha algo más reciente, a principios de siglo, se comprobó que el movimiento de Mercurio no era exactamente como debía ser. Esto dio lugar a muchos quebraderos de cabeza, hasta que Einstein demostró que las leyes de Newton no eran lo bastante exactas y debían modificarse.

Tratemos de responder a la siguiente pregunta: ¿hasta qué distancia se extiende la aplicación de las leyes de Newton? ¿Más allá del sistema solar? Déjenme enseñarles, en el grabado 1, una muestra de que la ley de la gravedad tiene un dominio de aplicación que se extiende más allá del sistema solar. En este grabado tenemos una serie de tres fotos de una estrella binaria, como lo llaman los

⁴ John Couch Adams, 1819-92, astrónomo matemático. Urbain Le Verrier, 1811 -77, astrónomo francés.

astrónomos. Por suerte, en la imagen aparece una tercera estrella que nos permite certificar que las estrellas realmente giran una alrededor de la otra y descartar que alguien haya dado la vuelta a la fotografía, cosa fácil cuando se trata de fotos de astros. En la figura 5 podemos ver la órbita que describen.



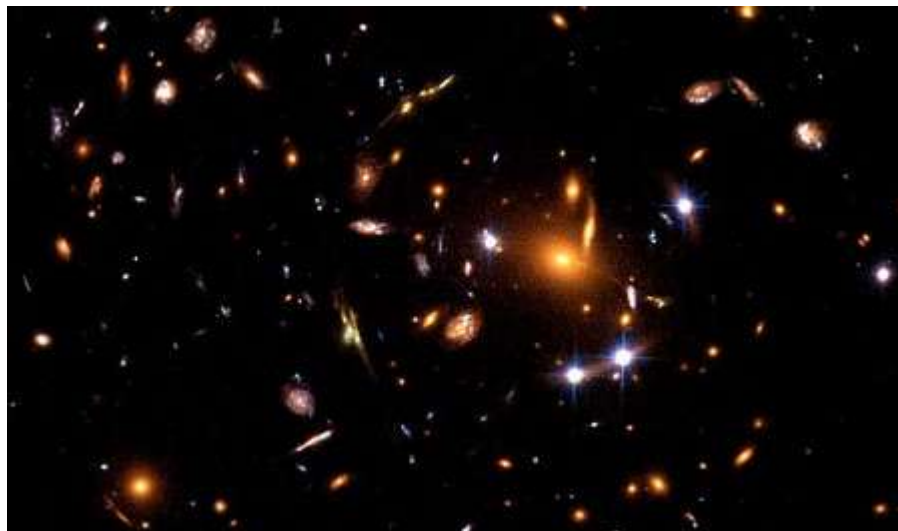
Fotografía 1. Tres fotografías tomadas en momentos distintos del mismo sistema binario.



Fotografía 2. Cúmulo globular



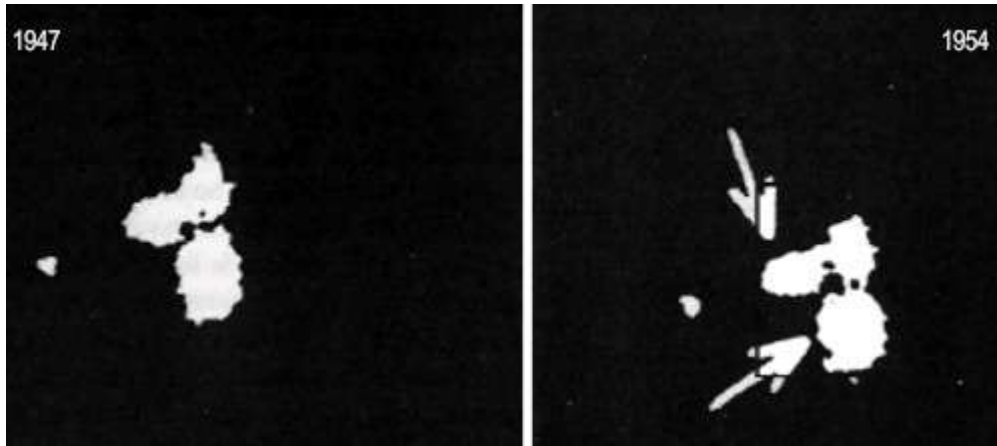
Fotografía 3. Galaxia espiral



Fotografía 4. Cúmulos de galaxias



Fotografía 5. Estrellas y nebulosa de gases



Fotografía 6. Demostración de la creación de nuevas estrellas

Está claro que una tira de la otra y que giran describiendo una elipse, como era de esperar. Se trata de una sucesión de posiciones, en instantes distintos, que avanzan en el sentido de las agujas del reloj. De manera que todo irá perfectamente hasta que alguien descubra, si es que alguno de ustedes no lo ha hecho ya, que el centro no es el foco de una elipse, sino que está un poco desviado. Así pues, algo pasa con la ley, ¿verdad? Pues no; Dios no nos ha concedido ver esta órbita de frente, sino inclinada en un curioso ángulo. Si tomamos una elipse, marcamos un foco, la inclinamos de cualquier manera y luego la observamos en proyección, veremos que el foco no tiene por qué coincidir con el foco de la imagen proyectada. Si la órbita se ve de esta manera es porque está inclinada en el espacio.

¿Y qué ocurre a una distancia mayor? En el ejemplo anterior la fuerza se ejerce entre dos estrellas, pero ¿alcanza distancias superiores a dos o tres sistemas solares? En la fotografía 2 observamos un objeto que tiene un diámetro equivalente a unas

cien mil veces el del sistema solar. Ahí hay un número enorme de estrellas. La mancha blanca no es un punto blanco homogéneo; si lo parece es por la imprecisión de nuestros instrumentos, pero dentro hay puntitos muy pequeños, igual que las demás estrellas, claramente separados unos de otros, sin colisiones entre ellos, cada uno moviéndose de un lado a otro en este gran cúmulo globular.

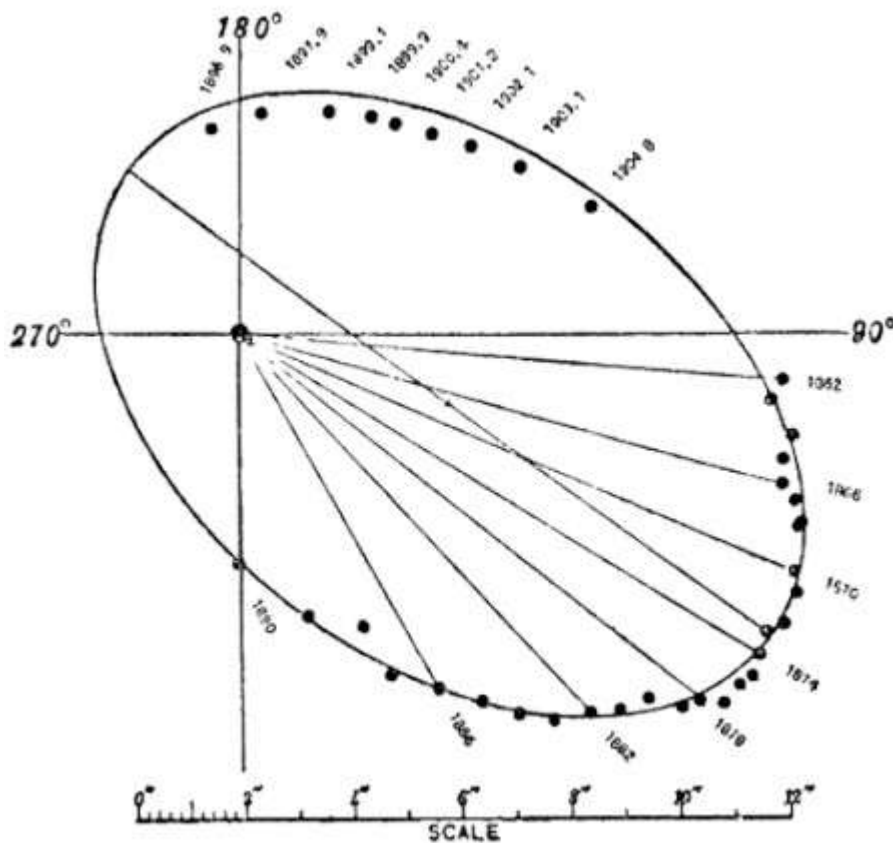


Figure 5

Se trata de uno de los objetos más hermosos del cielo, tanto como las olas del mar o las puestas de sol. La distribución de la materia que lo compone está perfectamente clara. Lo que mantiene unida a

esta galaxia es la atracción gravitatoria entre cada una de las estrellas. La distribución de la materia y el sentido de la distancia nos permite descubrir cuál es la ley de la fuerza entre las estrellas... y, naturalmente, se corresponde aproximadamente con la inversa del cuadrado. Las mediciones a estas distancias no son ni de lejos tan precisas como las efectuadas dentro del sistema solar.

La fuerza de la gravedad se extiende aún más allá. Este cúmulo no es más que un puntito en el interior de la gran galaxia de la fotografía 3, una galaxia típica. De nuevo resulta obvio que este objeto se mantiene unido gracias a alguna fuerza, y el único candidato razonable es la gravedad. A estas escalas ya no hay manera de comprobar si se cumple la ley de la inversa del cuadrado, aunque no cabe duda de que en estas inmensas aglomeraciones de estrellas (estas galaxias tienen un diámetro de 50.000 a 100.000 años luz, mientras que la distancia de la Tierra al Sol es tan sólo de ocho minutos luz) continúa rigiendo la gravedad. En la fotografía 4 tenemos la prueba de que su influencia se extiende aún más lejos. Lo que se muestra es un cúmulo de galaxias; éstas forman un solo bloque análogo a un cúmulo de estrellas, pero en este caso las unidades que se agrupan son grandullones como los de la fotografía 3.

Hemos llegado a una décima, quizás una centésima, parte del tamaño del universo, la distancia para la cual tenemos pruebas directas del alcance de la fuerza gravitatoria. Así pues, la gravedad de la Tierra no tiene límite, aunque a veces leamos en los periódicos que algún objeto ha escapado del campo gravitatorio terrestre. Éste

se va debilitando en proporción inversa al cuadrado de la distancia, lo que quiere decir que se divide por cuatro cada vez que multiplicamos la distancia por dos, hasta perderse en la confusión de los fuertes campos de las estrellas. Junto con la de las estrellas cercanas, la gravedad terrestre tira de las otras estrellas para formar nuestra galaxia, y todas ellas tiran de otras galaxias para dar lugar a un cúmulo de galaxias. Así pues, el campo gravitatorio de la Tierra nunca se acaba, sino que va difuminándose lentamente según una ley precisa, probablemente hasta el límite del universo.

La ley de la gravedad es diferente de la mayoría de las otras leyes. Está claro que es muy importante en lo que respecta al funcionamiento de la maquinaria el universo; a escala universal se aplica a multitud de fenómenos. Pero, curiosamente, tiene relativamente pocas aplicaciones prácticas en comparación con las demás leyes de la física. Se puede decir que he escogido un ejemplo atípico, aunque, en realidad, es imposible escoger algo que no sea atípico en algún sentido; ahí reside la maravilla del mundo. Las únicas aplicaciones que se me ocurren serían las prospecciones geofísicas, la predicción de las mareas y, en la actualidad, el cálculo de las trayectorias de los satélites artificiales y cohetes que mandamos al espacio. Otra aplicación reciente sería el cálculo de las posiciones de los planetas, de gran utilidad para los astrólogos que confeccionan los horóscopos de las revistas. Es un mundo extraño éste, en el que tantos avances de nuestro conocimiento se usan sólo para insistir en tonterías que tienen 2000 años de antigüedad.

Debo mencionar los casos más importantes en los que la gravedad tiene un efecto real sobre el universo, y uno de los más interesantes es la formación de nuevas estrellas. La fotografía 5 muestra una nebulosa gaseosa del interior de nuestra galaxia; no se trata de un montón de estrellas, sino de un gas. Las manchitas negras son zonas en las que el gas se ha comprimido, es decir, se ha atraído a sí mismo. Quizás al principio tenga lugar algún tipo de colisión, pero el resto del fenómeno se explica por el efecto de la gravedad que comprime el gas cada vez más, de forma que grandes volúmenes de gas y polvo se aglomeran y, a medida que continúan cayendo hacia su propio centro, el calor generado por esta caída enciende la masa de gas convirtiéndola en una estrella. En la fotografía 6 parece constatarse la creación de nuevas estrellas.

Así es como nacen las estrellas, cuando en virtud de la gravedad se aglomera una cantidad suficiente de gas. Cuando las estrellas explotan escupen gases y polvo, que se vuelven a aglomerar dando lugar a nuevas estrellas: se diría que es un movimiento perpetuo.

Ya he indicado que la gravedad abarca grandes distancias, pero Newton también dijo que todo era atraído por todo. ¿Es realmente cierto que dos cosas se atraen mutuamente? ¿Podemos verificarlo directamente sin tener que estudiar el movimiento de los planetas? Una verificación directa fue llevada a cabo por Cavendish⁵ con un equipo como el que aparece en la figura 6. El montaje consistía en una barra colgada de una fibra de cuarzo muy delgada con dos bolas en sus extremos, frente a las cuales se colocaron dos grandes

⁵ Henry Cavendish, 1731-1810, físico y químico inglés.

bolas de plomo. Aunque la fuerza gravitatoria entre objetos corrientes es ciertamente minúscula, la fibra experimentaba una pequeña torsión debido a la atracción de las bolas. De esta manera se consiguió medir la fuerza de torsión generada por las masas de plomo. Cavendish denominó a este experimento «pesaje de la Tierra». Con una enseñanza tan pedante y puntillosa como la actual, hoy en día no se permitiría a nuestros estudiantes decir tal cosa: habría que decir «medición de la masa de la Tierra».

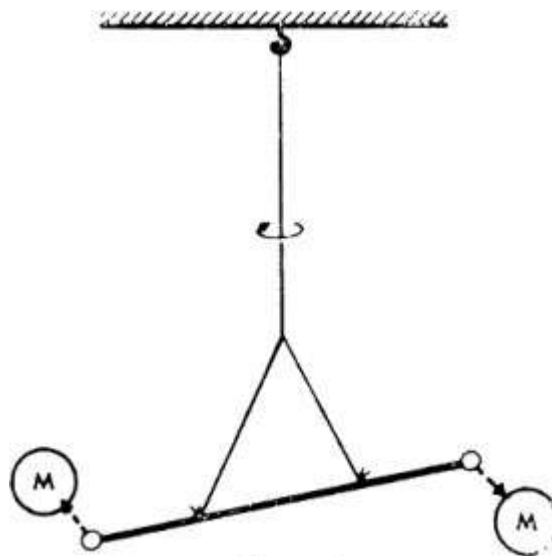


Figura 6

Mediante un experimento directo, Cavendish consiguió medir la fuerza, las dos masas y la distancia entre ambas, lo que le permitió determinar el valor de G , la constante gravitatoria. Alguno de ustedes pensará: «Muy bien, sabemos cuánto vale la atracción, cuáles son las masas de los objetos atraídos y la distancia que los separa, pero seguimos sin conocer la masa de la Tierra». Pero una

vez conocida la constante y el valor de la aceleración gravitatoria en la superficie de la Tierra, podemos determinar su masa.

Aunque de forma indirecta, este experimento fue el primero en determinar lo pesada o masiva que es la esfera sobre la que nos encontramos. Se trata de un logro sorprendente, y creo que fue por esto por lo que Cavendish denominó a su experimento «pesaje de la Tierra» y no «determinación de la constante de la fórmula de Newton». Dicho sea de paso, Cavendish estaba al mismo tiempo pesando el Sol, porque la atracción gravitatoria del Sol también es conocida.

Hay otro experimento muy interesante para verificar la ley de la gravedad: se trata de saber si la fuerza atractiva es exactamente proporcional a la masa. Si es así, entonces los movimientos inducidos por fuerzas gravitatorias, los cambios de velocidad, son inversamente proporcionales a la masa del objeto. Esto significa que dos objetos de masas diferentes se acelerarán de la misma manera en un campo gravitatorio; es decir, dos objetos distintos en el vacío caerán de la misma manera hacia la Tierra cualquiera que sea su masa. Éste es el viejo experimento de Galileo desde la torre inclinada de Pisa. Significa, por ejemplo, que un objeto colocado dentro de un satélite artificial describirá la misma órbita alrededor de la Tierra que uno situado en el exterior, por lo que parecerá que está flotando. El hecho de que la fuerza sea exactamente proporcional a la masa tiene esta interesante consecuencia.

¿Hasta qué punto se cumple esta propiedad? Un físico llamado Eotvós⁶ la verificó experimentalmente en 1909 y, más recientemente, Dicke⁷ hizo lo propio con mayor precisión, de manera que hoy sabemos que se cumple con un error inferior a $1/10.000.000.000$. Las fuerzas son exactamente proporcionales a las masas. ¿Cómo es posible medir con tanta precisión? Supongamos que queremos comprobar si la proporcionalidad es cierta en el caso del Sol. Sabemos que el Sol está tirando de nosotros, como también de la Tierra, pero supongamos que queremos saber si la atracción es exactamente proporcional a la inercia. El experimento correspondiente se llevó a cabo inicialmente con madera de sándalo; luego se usaron plomo y cobre, y en la actualidad se efectúa con polietileno. Como la Tierra gira alrededor del Sol, todos los objetos en su superficie son lanzados hacia fuera en una medida proporcional a su propia inercia. Pero también son atraídos por el Sol en proporción a su masa, según la ley de la gravedad. Así pues, si dos objetos distintos son atraídos por el Sol en proporción distinta a la que son expelidos por inercia, uno se moverá en dirección al Sol mientras que el otro se alejará, de manera que si los colocamos en los extremos de una barra colgada de una fibra de cuarzo, como en el experimento de Cavendish, todo el aparato girará hacia el Sol. Pero, con la precisión indicada, se comprueba que no gira, lo que nos confirma que la atracción del Sol sobre ambos objetos es exactamente proporcional al efecto centrífugo, que es la inercia; en consecuencia, la fuerza de atracción

⁶ Barón Roland von Eotvos, 1848-1919, físico húngaro.

⁷ Robert Henry Dicke, físico americano

sobre un objeto es exactamente proporcional a su coeficiente de inercia; en otras palabras, a su masa.

Hay algo particularmente interesante que quiero destacar. La ley de la inversa del cuadrado vuelve a aparecer en otros contextos, como, por ejemplo, en las leyes de la electricidad. La electricidad también ejerce fuerzas proporcionales a la inversa del cuadrado de la distancia, esta vez entre cargas, de manera que uno podría pensar que esta relación matemática está imbuida de algún significado profundo. Nadie ha conseguido hacer de la gravedad y la electricidad aspectos distintos de una misma cosa. Las teorías físicas actuales, nuestras leyes de la física, constituyen una multitud de piezas distintas que no encajan del todo bien. No poseemos una estructura de la cual se deduzca todo; tenemos varias piezas que todavía no encajan con exactitud. Así pues, en estas conferencias no podré decirles cuál es *la ley* de la física, y me tendré que conformar con hablar de los aspectos comunes a las distintas leyes, porque todavía no comprendemos la conexión existente entre ellas. Pero lo verdaderamente extraño es que haya aspectos compartidos. Veamos de nuevo la ley de la electricidad.

Las fuerzas gravitatoria y eléctrica son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia, pero lo realmente notable es la tremenda diferencia de intensidad entre ambas. Aquellos que busquen un mismo fundamento para la gravedad y la electricidad se encontrarán con que la segunda es mucho más fuerte que la primera, por lo que cuesta creer que tengan un origen común. ¿Cómo puedo decir que una cosa es más fuerte que otra? Todo

depende de la cantidad de carga que se tenga y de la masa que se posea. No podemos hablar de lo fuerte que es la gravedad diciendo «tomemos un pedazo de esta medida», porque la medida la escoge *uno mismo*. Si queremos obtener algo producido por la Naturaleza (un número puro que no tenga nada que ver con centímetros o años o cualquier cosa relativa a nuestras escalas dimensionales) podemos proceder de la siguiente manera: si tomamos una partícula elemental, como el electrón (cada partícula distinta nos dará un número distinto, pero para fijar ideas tomemos el electrón), resulta que dos electrones son dos partículas elementales que se repelen debido a la electricidad en proporción inversa al cuadrado de la distancia y se atraen debido a la gravedad en proporción inversa al cuadrado de la distancia.

Pregunta: ¿cuál es la relación entre la fuerza gravitatoria y la fuerza eléctrica? La respuesta se ilustra en la figura 7. La razón entre la atracción gravitatoria y la repulsión eléctrica viene dada por un número con una cola de 42 cifras. Ahora bien, aquí yace un misterio muy profundo. ¿De dónde surge un número tan monstruoso? Si en algún momento consiguiéramos una teoría de la que pudieran derivarse ambas fuerzas, ¿cómo podría conseguirse tan exagerada desproporción? ¿Qué ecuación admite una solución con una razón tan fantástica entre una fuerza atractiva y otra repulsiva?

Los físicos han buscado proporciones de este calibre en otras partes, con la esperanza de encontrar algún otro número de tal magnitud. Puestos a buscar un número grande, ¿por qué no tomar la razón entre el diámetro del universo y el de un protón? Cosa

Einstein tienen unos efectos mínimos. Una de estas modificaciones se refiere a que todas las masas caen. La luz tiene energía, y la energía es equivalente a la masa; en consecuencia, la luz también cae. Por ello la luz que pasa cerca del Sol debe desviarse, y así lo hace. Además, en la teoría de Einstein la fuerza de gravedad cambia algo, lo justo para dar cuenta de la pequeña discrepancia registrada en el movimiento de Mercurio. Por último, en cuanto a las leyes de la física aplicadas a pequeña escala, se ha descubierto que el comportamiento de la materia a muy pequeña escala obedece a leyes muy distintas de las que rigen los objetos a gran escala. La pregunta que surge de forma natural es: ¿qué aspecto tiene la gravedad a pequeña escala? Esto se conoce como teoría cuántica de la gravedad. En la actualidad no existe una teoría cuántica de la gravedad. Todavía no se ha logrado construir una teoría que sea consistente con la mecánica cuántica y el principio de incertidumbre.

Se me preguntará: «Muy bien, ya nos ha dicho lo que ocurre, pero ¿qué es la gravedad? ¿De dónde viene? ¿No nos dirá que un planeta mira al Sol, advierte la distancia a la que se encuentra, calcula la inversa del cuadrado de la distancia y decide moverse en consecuencia?». En otras palabras, aunque he enunciado la ley matemática, no he ofrecido ningún mecanismo. Discutiré esta posibilidad de explicación en la próxima conferencia, «La relación de las matemáticas con la física».

Para acabar, quiero subrayar las características que la ley de la gravedad comparte con las otras leyes que he mencionado a lo largo

de esta conferencia. En primer lugar, es matemática en su expresión; las demás también lo son. En segundo lugar, no es exacta: Einstein tuvo que modificarla y sabemos que aún no es del todo correcta, porque tiene que incorporársele la teoría cuántica. Esto mismo ocurre con todas las otras leyes: no son exactas. Siempre queda un ápice de misterio, una zona en la que todavía faltan algunos retoques. Esta puede ser o no una propiedad de la Naturaleza, pero lo cierto es que es común a todas las leyes tal como hoy las conocemos. Puede que sólo sea el reflejo de un conocimiento incompleto.

Pero lo más impresionante de todo es que la gravedad es simple. Es simple enunciarla completamente en sus principios, de forma que no quede flotando ninguna vaguedad que permita a alguien cambiar la esencia de la ley. Es simple y, en consecuencia, bella. Es simple en su forma, no necesariamente en su acción (los movimientos de los diversos planetas y sus perturbaciones mutuas pueden ser muy complicados de expresar en detalle, y seguir el movimiento de todas las estrellas de un cúmulo globular está más allá de nuestras capacidades). Es complicada en sus acciones, pero su forma básica, es decir, el sistema que subyace tras ella, es simple. Esto es común a todas nuestras leyes; todas resultan ser simples, aunque complejas en sus acciones.

Finalmente, quiero resaltar la universalidad de la ley de la gravedad y el hecho de que se extienda a lo largo de tan grandes distancias, de tal forma que Newton, ocupado en el sistema solar, pudo predecir lo que iba a ocurrir en el experimento de Cavendish, mientras que el

pequeño modelo de Cavendish (las dos esferas atrayéndose mutuamente) debe multiplicarse por diez billones para convertirse en el sistema solar. Si lo ampliamos por un factor de otros diez billones nos encontramos con las galaxias atrayéndose mutuamente según la misma ley. La naturaleza utiliza solamente las hebras más largas para tejer sus formas, de manera que cada pequeño rincón de su tela revela la organización de la totalidad del tapiz.

Capítulo 2

La relación de las matemáticas con la física

Pensando en las aplicaciones de las matemáticas y de la física, parece natural que las matemáticas sean de utilidad cuando están en juego números grandes en situaciones complejas. En biología, por ejemplo, la acción de un virus o una bacteria no es matemática. Si se observa un virus concreto al microscopio, éste puede descubrir un lugar de la superficie bacteriana (cada bacteria tiene su forma propia) por donde introducir su ADN, o puede no hacerlo. Pero si experimentamos con millones y millones de bacterias y virus podemos aprender mucho sobre ellos haciendo promedios. Podemos emplear las matemáticas para hallar los promedios, para descubrir si los virus se desarrollan dentro de las bacterias, si surgen nuevos tipos y en qué proporciones, y a partir de ahí hacer un estudio genético considerando sus mutaciones, etc.

Por poner otro ejemplo aún más trivial, imaginemos un inmenso tablero de damas. La operación misma de efectuar una jugada no es matemática (o al menos es de una gran simplicidad matemática). Pero es fácil ver que sobre un tablero enorme, con una gran cantidad de piezas, el análisis de las jugadas buenas y malas debe requerir alguna clase de razonamiento profundo. Aquí es donde entran en juego las matemáticas, que requieren un razonamiento abstracto. Otro ejemplo podría ser la puesta en marcha de una computadora. No hay nada demasiado matemático en accionar el interruptor que apaga y enciende el aparato, aunque a los

matemáticos les gusta empezar por ahí. Pero entender lo que hace un sistema muy grande, con todos sus empalmes y conexiones, exige matemáticas.

Antes que nada, quiero decir que las matemáticas son de enorme utilidad en física cuando se trata de abordar un análisis detallado de los fenómenos que ocurren en situaciones complicadas para extraer las reglas fundamentales del juego. Esto es algo a lo que dedicaría la mayor parte de mi tiempo si sólo tuviera que hablar de la relación entre la matemática y la física. Pero, puesto que esta conferencia forma parte de una serie sobre el carácter de la ley física, no tengo tiempo de discutir lo que ocurre en situaciones complicadas, por lo que voy a pasar enseguida a otra cuestión, a saber, el carácter de las leyes fundamentales.

Si volvemos a nuestro juego de damas, las leyes fundamentales son las reglas según las cuales movemos las piezas. Las matemáticas pueden utilizarse en una situación complicada para encontrar, en las circunstancias dadas, la mejor jugada. Pero, en el caso de las damas, el carácter simple y fundamental de sus leyes básicas hace que se necesiten muy pocas matemáticas para expresarlas. En realidad, son expresables en lenguaje coloquial.

Lo curioso de la física es que incluso las leyes fundamentales tienen carácter matemático. Voy a dar dos ejemplos, uno que requiere matemáticas y otro que no. En primer lugar, existe en física una ley, la ley de Faraday, que establece que, en la electrólisis, la cantidad de material depositado es proporcional al tiempo durante el que circula la corriente y a la intensidad de la misma. Lo cual significa

que la cantidad de material depositado es proporcional a la carga eléctrica que discurre por el sistema. Todo esto parece muy matemático, pero lo que realmente ocurre es que cada electrón que circula por el hilo conductor porta una carga. Por poner un ejemplo concreto, digamos que para que se deposite un átomo hace falta la colaboración de un electrón, de manera que el número de átomos depositados es necesariamente igual al número de electrones que pasan y, en consecuencia, proporcional a la carga que pasa por el conductor. Así, una ley en apariencia matemática no tiene como base nada demasiado profundo ni requiere un verdadero conocimiento de las matemáticas. Supongo que el hecho de que se necesite un electrón por cada átomo que se deposita es en sí mismo matemático, pero no es la clase de matemáticas a la que me estoy refiriendo.

Por otro lado, tomemos la ley de la gravedad de Newton, de la que ya hemos hablado. He aquí la ecuación:

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

La expongo sólo para impresionarles por la rapidez con que los símbolos matemáticos pueden proporcionar información. Dije que la fuerza de gravedad entre dos objetos es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, y también que los cuerpos reaccionan a las fuerzas cambiando de velocidad, o de movimiento, en la dirección de la

fuerza, en magnitud proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la masa. No hay duda de que esto son palabras y de que no he tenido ninguna necesidad de escribir la ecuación. Sin embargo, se trata de una descripción que tiene algo de matemático, y cabe preguntarse cómo algo así puede ser una ley fundamental. ¿Qué es lo que hace el planeta? ¿Acaso mira al Sol, evalúa la distancia a la que se encuentra y decide poner en marcha su calculadora interior para hallar la inversa del cuadrado de la distancia y así saber cómo moverse? ¡Quién va a creerse que esto sea una explicación del funcionamiento de la gravedad! Quizá queramos, como han hecho otros, ir más allá. A Newton se le recriminó que su teoría «no significa nada, no nos dice nada», a lo que él contestó: «Nos dice *cómo* se mueve, y esto debería ser suficiente». Pero la gente suele quedarse insatisfecha si no se le ofrece un mecanismo, y me gustaría describir una de entre las muchas teorías que pretenden explicar el porqué. Esta teoría afirma que el efecto de la gravedad es el resultado de un gran número de acciones, lo que explicaría su carácter matemático.

Supongamos que por todas partes hay un gran número de partículas volando a gran velocidad. Vienen por igual de todas direcciones. Tanto nosotros como el Sol somos para ellas prácticamente transparentes. Prácticamente, pero no del todo, porque algunas de ellas impactan contra nosotros. Veamos lo que ocurre entonces (figura 8).

S representa el Sol y T la Tierra. Si el Sol no estuviera donde está, de todas direcciones llegarían a la Tierra partículas que impactarían

con nosotros propinándonos empujoncitos. Como vendrían tantas partículas de un lado como de otro, la Tierra no se movería en ninguna dirección concreta.

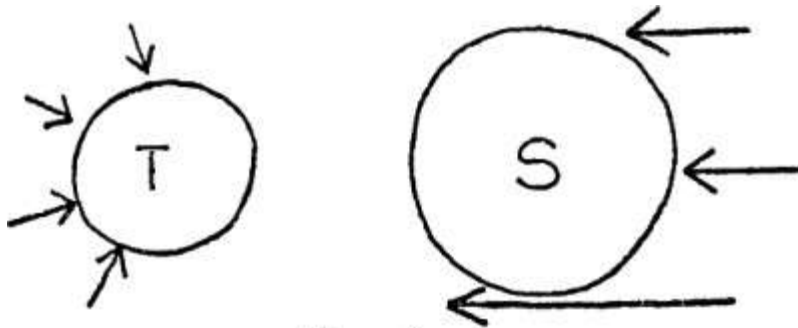


Figura 8

Cuando el Sol está presente, sin embargo, las partículas que vienen en su dirección son parcialmente absorbidas por él, puesto que no todas lo atraviesan. En consecuencia, el número de partículas en la dirección del Sol es menor que el de las que nos llegan de otras direcciones. Es fácil ver que cuanto más lejos se halle el Sol de nosotros menor será el número de partículas que dejen de llegarnos. El Sol parecerá más pequeño (en realidad, en proporción inversa al cuadrado de la distancia). Como consecuencia, la Tierra experimentará un impulso hacia el Sol que variará en función inversa del cuadrado de la distancia; y ello será resultado de un gran número de operaciones muy simples, un golpecito tras otro, en todas direcciones. De esta forma el carácter extraño de la relación matemática quedará ciertamente atenuado, porque la operación fundamental es mucho más simple que el cálculo de la inversa del

cuadrado de la distancia. La fórmula es sustituida por una descripción basada en partículas que rebotan.

El único problema con esta idea es que no funciona. Cualquier teoría que inventemos debe contrastarse considerando *todas* sus posibles consecuencias para ver si predice algo más, y ésta lo hace. Si la Tierra se mueve, recibirá más impactos de frente que por detrás. (Si corremos bajo la lluvia, nos caerá más agua en la cara que en el codo, porque corremos hacia la lluvia.) Así pues, la Tierra avanzará hacia las partículas que le llegan por delante y se alejará de las que le llegan por detrás, con lo cual habrá más impactos por delante que por detrás, lo que dará lugar a una fuerza que se opondrá a su avance. Esta fuerza frenaría la velocidad de la Tierra en su órbita, por lo que ésta no habría podido mantenerse girando alrededor del Sol durante tres o cuatro mil millones de años, como mínimo. Así pues, hay que descartar esta teoría. «Pero bueno», pensará alguien, «no estaba tan mal, y me permitió prescindir de las matemáticas; quizá pueda inventarse una mejor». Y puede que tenga razón; quién sabe lo que puede ocurrir en última instancia. Pero, desde los tiempos de Newton hasta hoy, nadie ha inventado otra descripción de la maquinaria matemática subyacente tras esta ley que no sea una repetición de lo mismo con otras palabras, o que no complique las matemáticas, o que no haga predicciones falsas. Actualmente no existe ningún modelo de la teoría de la gravedad aparte de su expresión matemática.

Si ésta fuera la única ley así, ello sería tan interesante como enojoso. Pero resulta que cuanto más investigamos, cuantas más

leyes descubrimos, cuanto más profundamente penetramos en la naturaleza, tanto más persiste la enfermedad. Cada una de nuestras leyes es una afirmación puramente matemática, expresada en unas matemáticas más bien complejas y abstrusas. La expresión de Newton de la ley de la gravedad es, desde el punto de vista matemático, relativamente simple. Pero se hace cada vez más abstrusa a medida que avanzamos. ¿Por qué? No tengo la menor idea. Mi propósito hoy es el de informarles de este hecho. El objetivo de esta conferencia es simplemente subrayar que es imposible comunicar honestamente la belleza de las leyes de la naturaleza, de manera que la gente pueda realmente sentirla, si la gente no posee un conocimiento profundo de las matemáticas. Lo siento, pero así parece.

Alguien podrá decirme: «Muy bien, pues si no existe explicación alguna de la ley, al menos dígame ¿qué es la ley? ¿Por qué no me lo dice en palabras en vez de decírmelo con símbolos? Las matemáticas no son más que un lenguaje, y quiero ser capaz de traducir este lenguaje». De hecho podría hacerlo, con paciencia, e incluso creo que hasta cierto punto ya lo he hecho. Podría añadir de forma más concreta que la ecuación significa que si la distancia es el doble, la fuerza no es más que la cuarta parte, y así sucesivamente. Sería posible convertir todos los símbolos en palabras. Dicho de otra manera, podría ser amable con el hombre de la calle que ha venido hasta aquí con la esperanza de que yo vaya a explicarle algo. Uno puede ganarse una buena reputación si es capaz de explicar al hombre de la calle, en el lenguaje del hombre de

la calle, temas tan abstrusos y difíciles como éstos. Y el hombre de la calle busca y rebusca en un libro tras otro con la esperanza de eludir las complejidades que finalmente acaban imponiéndose, incluso con la ayuda del mejor divulgador. A medida que lee va encontrándose con una confusión cada vez mayor, con proposiciones cada vez más complicadas, con una dificultad tras otra, carentes todas ellas de conexión aparente. Ante tamaña oscuridad confía en que quizás encontrará la explicación en otro libro... Este último autor se acercó bastante, quizá la solución esté en el próximo.

Yo no creo que sea posible, porque las matemáticas *no* son simplemente otro lenguaje. Las matemáticas son otro lenguaje más razonamiento; son un lenguaje más una lógica. Las matemáticas son un instrumento para razonar. De hecho, son una gran colección de resultados obtenidos por un cuidadoso proceso de pensamiento y razonamiento. Mediante las matemáticas es posible establecer una conexión entre una afirmación y otra. Por ejemplo, puedo decir que la fuerza está orientada hacia el Sol. También puedo decir, como ya he hecho, que los planetas se mueven de tal manera que si trazo una línea desde el Sol hasta uno de ellos y dibujo la misma línea en un momento posterior, digamos tres semanas más tarde, resulta que el área recorrida por la línea del planeta al girar éste alrededor del Sol es exactamente la misma que la que recorrerá durante las próximas tres semanas y durante las tres semanas posteriores. Puedo explicar detalladamente ambas afirmaciones, pero no puedo explicar por qué ambas son idénticas. Las enormes complejidades

aparentes de la naturaleza, con todas sus curiosas reglas y leyes, están estrechamente vinculadas entre sí. Esto es cierto, pero sin matemáticas no es posible descubrir, entre la enorme variedad de hechos, la lógica que permite pasar de una a otra.

Quizá parezca increíble que pueda demostrarse que se cubren áreas iguales en tiempos iguales si las fuerzas se orientan hacia el Sol. Por ello, si se me permite, voy a demostrar que ambas cosas son de hecho equivalentes, con la intención de que puedan ustedes ver más allá de la simple descripción de ambas leyes. Voy a mostrar que las dos leyes están vinculadas de tal forma que puede pasarse de una a otra mediante un razonamiento simple, y las matemáticas no son más que razonamiento organizado. Con ello podrán apreciar la belleza de la relación entre ambas afirmaciones. Voy a demostrar la relación que existe entre afirmar que las fuerzas están orientadas hacia el Sol y que se cubren áreas iguales en tiempos iguales.

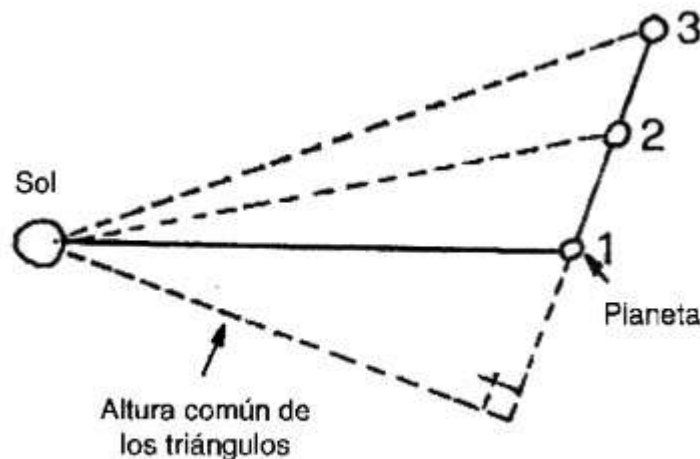
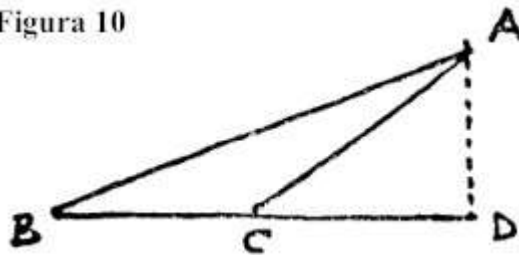


Figura 9

Empecemos con un sol y un planeta (figura 9) y supongamos que en un instante determinado el planeta se halla en la posición 1. El planeta se mueve de tal manera que un segundo más tarde se halla en la posición 2. Si el sol no ejerciera fuerza alguna sobre el planeta, por el principio de inercia de Galileo, éste describiría una línea recta, de manera que al cabo de otro segundo se habría desplazado exactamente la misma distancia sobre la misma línea recta, hasta la posición 3. Primero voy a mostrar que, si *no* existe fuerza alguna, entonces se cubren áreas iguales en tiempos iguales. Quiero recordarles que el área de un triángulo es igual a un medio de la base por la altura, y que la altura es la distancia vertical hasta la base. Si el triángulo es obtuso (figura 10), la altura es la distancia vertical AD y la base es BC. Comparemos a continuación las áreas recorridas si el sol no ejerciera fuerza alguna (figura 9).

Figura 10



Recuérdese que las dos distancias 1-2 y 2-3 son iguales. La cuestión es si también las dos áreas son iguales. Considérese el triángulo formado por el sol y los puntos 1 y 2. ¿Cuál es su área? Es el producto de la base 1-2 por la mitad de la distancia perpendicular entre la base y S. ¿Qué pasa con el otro triángulo, el formado al desplazarse el planeta de 2 a 3? Su área es la base 2-3 multiplicada

por la mitad de la altura. Ambos triángulos tienen la misma altura y, tal como hemos indicado, la misma base, por lo que deben tener la misma área. De momento, pues, todo bien. Si el sol no ejerciera fuerza alguna, se barrerían áreas iguales en tiempos iguales. Pero el sol ejerce una fuerza. Durante el intervalo 1-2-3 el sol tira del planeta hacia sí y cambia la dirección del movimiento. Con el fin de obtener una buena aproximación, consideraremos la posición central, o posición media, en 2, y asumiremos que el efecto de la acción de la fuerza durante el intervalo 1-3 consiste en cambiar en alguna medida el movimiento del planeta en la dirección de la línea 2-S (figura 11).

Esto significa que, aunque el planeta se movía sobre la línea 1-2 y hubiese continuado en esa dirección de no existir una fuerza, la influencia del sol altera el movimiento de manera que se orienta en una dirección paralela a la línea 2-S.

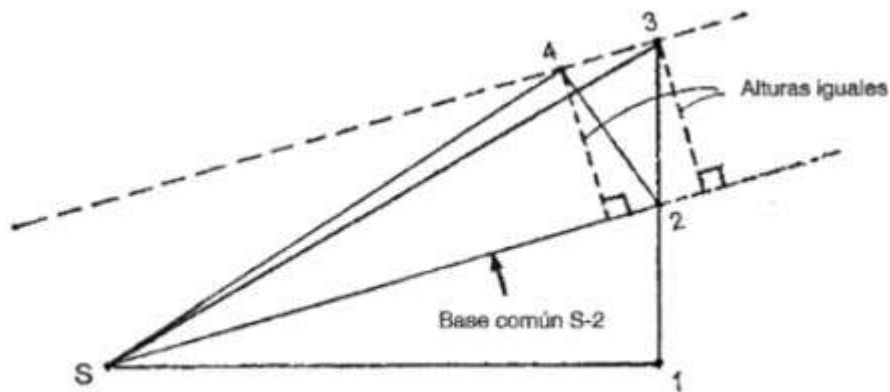


Figura 11

Por lo tanto, el movimiento siguiente estará compuesto de lo que el planeta hubiera querido hacer más el cambio inducido por la acción del sol. En consecuencia, el planeta se sitúa en la posición 4 en lugar de 3. Ahora nos interesa comparar las áreas de los triángulos 23S y 24S, y me propongo demostrar que son iguales. Ambos tienen la misma base S-2. ¿Tienen también la misma altura? Por supuesto, pues se trata de rectas paralelas comprendidas entre paralelas. La distancia de 4 al segmento S-2 es la misma que la distancia de 3 al segmento S-2 (una vez prolongado), lo que implica que el área del triángulo S24 es la misma que la del triángulo S23. Antes he demostrado que las áreas S12 y S23 eran iguales, por lo que $S12 = S24$. Así pues, en el movimiento orbital verdadero del planeta, el área recorrida durante el primer segundo es igual al área recorrida durante el segundo siguiente. En conclusión, el razonamiento anterior nos permite constatar la conexión entre el hecho de que la fuerza se dirija hacia el sol y el hecho de que las áreas sean iguales. ¿No es ingenioso? Pues lo he tomado prestado directamente de Newton. Hasta el diagrama procede de los *Principia*. Únicamente los símbolos son distintos, porque él escribía en latín y yo he usado números árabes.

Todas las demostraciones de Newton son geométricas. Actualmente no se utiliza este tipo de razonamiento, que ha sido sustituido por el razonamiento analítico mediante símbolos. Hace falta mucha habilidad para dibujar los triángulos correctamente, apreciar el tamaño de las áreas y conseguir demostrar que son iguales. Desde entonces se han mejorado los métodos analíticos, que son más

rápidos y eficientes. Quiero mostrarles qué aspecto tiene el mismo razonamiento con una notación matemática más moderna, en la que para llegar al resultado apetecido lo único que se hace es escribir un montón de símbolos.

Queremos afirmar algo sobre la rapidez con que cambian las áreas, y esto lo representamos por \dot{A} . El área cambia al girar el radio, y la rapidez del cambio viene dada por el componente de la velocidad perpendicular al radio multiplicado por la longitud del radio.

$$\dot{A} = \vec{r} \times \dot{\vec{r}}$$

La siguiente cuestión es cómo cambia a su vez la propia tasa de cambio del área. Sabemos que, según nuestra ley, no debe haber cambio. Así pues, tenemos que diferenciar otra vez la expresión, lo que significa utilizar un truco consistente en poner unos puntitos en los lugares debidos, y eso es todo. Claro que hay que aprender el truco, pero todo se reduce a una serie de reglas que se han demostrado muy útiles para este fin. Así que escribimos:

$$\ddot{A} = \dot{\vec{r}} \times \dot{\vec{r}} + \vec{r} \times \ddot{\vec{r}} = \vec{r} \times \vec{F}/m$$

El primer término nos dice que debemos tomar el componente de la velocidad perpendicular a la velocidad. Es cero, porque la velocidad va en la misma dirección que sí misma. La aceleración, que es la segunda derivada (r con dos puntos) o la derivada de la velocidad, es la fuerza dividida por la masa.

Todo ello nos dice que la tasa de cambio de la tasa de cambio del área es la componente de la fuerza perpendicular al radio; pero, si la fuerza va en la dirección del radio, entonces

$$\vec{r} \times \vec{F}/m = 0 \quad \text{o} \quad \ddot{A} = 0$$

tal como dijo Newton; es decir, no hay fuerza perpendicular al radio, lo que significa que la tasa de cambio del área no cambia. Esto es una simple ilustración del poder del análisis matemático. Newton sabía más o menos cómo efectuar este análisis con una notación algo distinta, pero prefirió escribirlo todo en forma geométrica porque quiso facilitarle al público la lectura de sus obras. El fue el inventor del cálculo infinitesimal, el tipo de matemáticas que acabo de utilizar.

Este es un buen ejemplo de la relación de las matemáticas con la física. Cuando en física un problema se complica, solemos acudir a los matemáticos, quienes pueden haberlo estudiado y, en consecuencia, concebido una línea argumental que podemos seguir. Si no es así, no nos queda más remedio que inventar nuestro propio razonamiento, que luego ofrecemos a los matemáticos. Cualquiera que razone cuidadosamente sobre cualquier cosa está contribuyendo al conocimiento de lo que ocurre cuando se piensa en algo; si se hace abstracción de ese algo y se envía el resultado a la facultad de ciencias exactas, en seguida se convierte en una rama de las matemáticas. Así pues, las matemáticas son un modo de pasar de un conjunto de proposiciones a otro. Su utilidad en física

es evidente, porque tenemos tantas maneras distintas de hablar de las cosas, y las matemáticas nos permiten obtener consecuencias, analizar situaciones e ir cambiando las leyes para conectar las distintas proposiciones. En realidad, la cantidad total de cosas que sabe un físico es muy pequeña. Tiene únicamente que recordar las reglas de traslación de una cosa a otra, porque todas las afirmaciones sobre tiempos iguales, sobre la fuerza en la dirección del radio, etc., están interrelacionadas por el razonamiento.

Surge ahora una cuestión interesante. ¿Existe un sitio por donde empezar a deducir todo lo demás? ¿Existe en la naturaleza algún orden o forma particular que nos permita decir que un cierto conjunto de proposiciones es más fundamental, o que otro conjunto es más derivado? En matemáticas hay dos enfoques que, para nuestros propósitos, voy a llamar tradición babilónica y tradición griega. En las escuelas babilónicas de matemáticas el estudiante aprendía practicando con numerosos ejemplos hasta que retenía la regla general. Además aprendía también mucha geometría, muchas propiedades de los círculos, el teorema de Pitágoras, fórmulas para las áreas de los cubos y triángulos. También se le proporcionaba cierto nivel de argumentación que le permitiera pasar de una cosa a otra. Había tablas numéricas que le permitían resolver ecuaciones complicadas. Todo estaba orientado a calcular cosas. Pero Euclides descubrió que existía un procedimiento por el cual podían obtenerse todos los teoremas de la geometría a partir de un conjunto muy simple de axiomas. La actitud babilónica (o lo que yo llamo matemáticas babilónicas) consiste en saberlo todo sobre los

diferentes teoremas y muchas de las conexiones existentes entre ellos, pero sin haber constatado nunca que todo puede obtenerse a partir de un puñado de axiomas. La matemática más moderna se centra en unos axiomas y unas demostraciones dentro de una estructura muy definida de convenios sobre lo que puede y no puede aceptarse como un axioma.

La geometría moderna parte de axiomas como los de Euclides, aunque perfeccionados, y a continuación deduce todo el sistema. Por ejemplo, no cabe esperar que un teorema como el de Pitágoras (según el cual el cuadrado de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los catetos) se acepte como un axioma. Por otra parte, desde otro enfoque de la geometría, el enfoque de Descartes, el teorema de Pitágoras es un axioma.

Así que lo primero que debemos aceptar es que incluso en matemáticas se puede partir de sitios distintos. Si todos estos teoremas están conectados mutuamente por el razonamiento, entonces no puede decirse «éstos son los axiomas más fundamentales», porque si partiéramos de otros también podríamos llegar a los mismos resultados. Es como un puente construido sobre muchos pilares, todos ellos conectados entre sí más de lo necesario, de manera que si alguna de las conexiones se desmorona, siempre se pueden restablecer los contactos por otro camino. La tradición matemática contemporánea consiste en elegir unas ideas concretas como axiomas por algún tipo de convención y construir a partir de ellas toda la estructura. Lo que he llamado enfoque babilónico

consiste en decir: «Resulta que conozco esto, y también aquello, y quizá también eso otro; y de ahí voy sacándolo todo. Mañana quizá me olvide de algo que es verdad, pero recordaré otra cosa que es cierta, de manera que podré reconstruirlo todo otra vez. No sé nunca dónde se supone que tengo que comenzar o dónde tengo que terminar. Me basta con recordar siempre lo suficiente para que, si me olvido de algo o algunas partes se pierden, pueda reconstruirlo todo de nuevo».

El método de partir siempre de axiomas no es muy eficiente si se trata de obtener teoremas. Si se está trabajando con algún problema geométrico es poco práctico volver a empezar cada vez desde los axiomas. Es cierto que si sólo pudiéramos recordar unas pocas cosas, con recordar los axiomas podríamos siempre llegar a cualquier parte, pero es mucho más eficiente obrar de la otra manera. Decidir cuáles son los mejores axiomas no es necesariamente la manera más eficiente de ir de un sitio a otro. En física necesitamos el método babilónico y no el euclidiano o griego. Me gustaría explicar por qué.

El problema del método euclidiano es conseguir algo más interesante o importante a partir de los axiomas. En el caso de la gravedad, por ejemplo, lo que nos plantearíamos sería: ¿es más importante, más básico, o es mejor como axioma decir que la fuerza tiene la dirección del sol, o decir que se barren áreas iguales en tiempos iguales? Desde cierta perspectiva, el enunciado en términos de fuerza es mejor. Basta con expresar las fuerzas a las que nos referimos para poder analizar sistemas de muchos cuerpos cuyas

órbitas ya no son elipses, porque la proposición en términos de fuerza nos habla de las respectivas atracciones mutuas. En este caso no nos sirve el teorema en términos de áreas iguales. Por esta razón, pienso que es la ley en términos de fuerza, y no la otra, la que debería considerarse un axioma. Por otra parte, el principio de áreas iguales puede generalizarse al caso de un sistema de muchos cuerpos en términos de otro teorema, bastante complicado de expresar y mucho menos bonito que la proposición inicial en términos de áreas iguales, pero que claramente se deriva de él. Considérese un sistema con un número elevado de cuerpos, por ejemplo Júpiter, Saturno, el Sol y numerosas estrellas, todos en mutua interacción, y contémplese desde muy lejos proyectado sobre un plano (figura 12). Como los cuerpos se mueven en múltiples direcciones, tómese cualquier punto y calcúlese el área cubierta por los radios trazados desde ese punto a cada uno de los cuerpos. En este cálculo, sin embargo, debe tenerse en cuenta que las masas mayores contarán más; para concretar, si un cuerpo pesa el doble que otro, su área valdrá también el doble. De manera que contando las áreas recorridas en proporción a la masa del cuerpo que define el área y sumando todas las áreas, encontramos que *esta cantidad total no cambia con el tiempo*. Esta magnitud se denomina momento angular, y el resultado obtenido es la ley de la conservación del momento angular. Conservación significa simplemente que se mantiene constante.

Una consecuencia de este resultado es la siguiente. Imaginemos una multitud de estrellas que caen las unas hacia las otras

formando una nebulosa o una galaxia. Al principio están muy lejos, en el extremo de unos radios muy largos, moviéndose despacio y cubriendo áreas pequeñas. A medida que se van acercando unas a otras, sus distancias al centro disminuyen, y cuando estén muy cerca sus radios serán muy pequeños, de manera que para cubrir la misma área por unidad de tiempo tendrán que moverse mucho más rápido. Nos encontramos con que a medida que las estrellas se acercan al centro giran cada vez más deprisa, lo que nos permite comprender de manera cualitativa la forma de las nebulosas espirales. De la misma manera podemos entender la forma en que un patinador gira en torno a sí mismo.

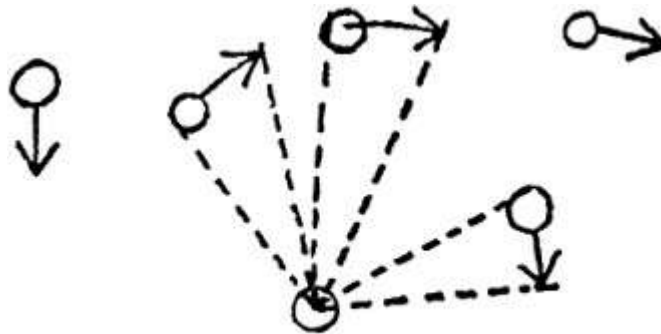


Figura 12

Empieza a girar despacio con una pierna extendida, pero a medida que encoge la pierna va adquiriendo velocidad. Con la pierna extendida traza cierta área por segundo, pero cuando recoge la pierna debe girar mucho más rápido para cubrir la misma área. Lo cierto es que este resultado no lo hemos demostrado en el caso del patinador: éste utiliza la fuerza de sus músculos, mientras que la

gravedad es una fuerza distinta. Sin embargo, *también* se cumple para el patinador.

Pero ahora tropezamos con un problema. A menudo resulta que de una parte de la física, como la ley de la gravedad, se puede deducir un principio de validez mucho más amplia. Esto no ocurre en matemáticas: los teoremas no aparecen donde no les toca. En otras palabras, si dijéramos que el postulado de la física es la igualdad de las áreas en la ley de la gravedad, de ahí podríamos deducir la ley de la conservación del momento angular, pero solamente para el caso de la gravedad. Sin embargo, descubrimos experimentalmente que la ley de la conservación del momento angular es de aplicación mucho más amplia. Newton había establecido otros postulados a partir de los cuales podía obtener la ley de conservación del momento angular en sus términos más amplios. Pero esas otras leyes de Newton eran falsas. En ellas no había fuerzas, y sí bastantes tonterías, los cuerpos no describían órbitas, etc. Sin embargo, la transformación exacta del principio de igualdad de áreas en el principio de conservación del momento angular sí que es correcta. También lo es en el caso de los movimientos atómicos de la física cuántica y, en la medida en que podemos juzgarlo, todavía hoy nos parece exacta. En física poseemos estos vastos principios que abarcan diferentes leyes y cuya derivación no conviene tomar demasiado al pie de la letra, porque si creemos que un principio es válido solamente si lo es el precedente no seremos capaces de entender las interconexiones entre las diferentes ramas de la física. Algún día, cuando la física esté completa y conozcamos todas sus

leyes, quizá podamos partir de ciertos axiomas y de ahí deducir todo el resto. Pero mientras no conozcamos todas las leyes, podemos valemnos de algunas de ellas para especular sobre teoremas que no podemos demostrar. Para comprender la física hay que mantener un adecuado equilibrio y tener en la cabeza las distintas proposiciones y sus interrelaciones, porque las leyes a menudo tienen implicaciones que van más allá de lo deducible. Esto sólo dejará de tener importancia cuando se conozcan todas las leyes.

Otra cosa interesante, y muy rara, en cuanto a la relación entre las matemáticas y la física es el hecho de que mediante argumentos matemáticos podamos demostrar que es posible tomar puntos de partida en apariencia muy distintos para llegar al mismo resultado. Esto está bastante claro. En vez de axiomas se puede utilizar alguno de los teoremas; pero en realidad las leyes de la física están construidas de manera tan delicada que sus distintas proposiciones, aunque equivalentes, tienen un carácter cualitativamente tan distinto que ello las hace mucho más interesantes. A modo de ilustración permítanme enunciar la ley de la gravedad de tres formas distintas, todas ellas equivalentes aunque suenen de manera muy diferente.

El primer enunciado es el de que existen fuerzas entre objetos que cumplen la ecuación que ya conocemos.

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

Cada objeto, al sentir la presencia de la fuerza, acelera o cambia de movimiento en una determinada cantidad por segundo. Ésta es la forma normal de enunciar la ley que llamaré de Newton. Este enunciado de la ley afirma que la fuerza depende de algo que se halla a una distancia finita. Tiene lo que llamamos un carácter no local. La fuerza sobre un objeto depende de dónde se halle otro objeto.

Quizá no les guste la idea de acción a distancia. ¿Cómo puede un objeto saber lo que pasa en otro sitio? Por ello existe otra manera, muy extraña, de expresar las leyes: en forma de campos. Es difícil de explicar, pero me gustaría darles una idea aproximada de en qué consiste. Existe un número en cada punto del espacio (se trata de un número, no de un mecanismo: esto es lo problemático de la física, que debe ser matemática) y los números cambian cuando nos desplazamos de un sitio a otro. Si un objeto está situado en un punto del espacio, la fuerza ejercida sobre él se dirige hacia donde el número cambia más deprisa (le voy a dar su nombre habitual, potencial, de manera que la fuerza va en el sentido del cambio de potencial). Además, la fuerza es proporcional a la rapidez con que cambia el potencial a medida que nos desplazamos. Ésta es una parte del enunciado, aunque falta algo, porque aún no les he dicho la manera de determinar la variación del potencial. Podría decirles que el potencial varía en función inversa a la distancia entre cada objeto, pero esto significaría volver a la idea de acción a distancia. La ley puede enunciarse de otra manera, según la cual no hay por qué saber nada de lo que ocurre fuera de una pequeña esfera. Si se

quiere saber cuál es el potencial en el centro de la esfera, basta con medir el potencial de la superficie de la esfera, por pequeña que sea. No hay que buscar fuera de ella, basta con que sepamos cuál es el potencial en un entorno y cuánta masa contiene la esfera. Ésta es la regla. El potencial en el centro es igual al potencial medio de la superficie de la esfera, menos la misma constante G que en la otra ecuación, dividido por el doble del radio de la esfera (que denominaremos a) y multiplicado por la masa contenida en la esfera, siempre que ésta sea lo bastante pequeña.

$$\begin{aligned} \text{Potencial en el centro} &= \\ &= \text{potencial medio sobre la esfera} - \frac{G}{2a} (\text{masa contenida}) \end{aligned}$$

Está claro que esta ley es distinta de la anterior, porque nos dice lo que ocurre en un punto en términos de lo que ocurre en un entorno muy cercano del mismo. La ley de Newton nos dice lo que ocurre en un instante del tiempo en términos de lo que ocurre en otro instante. Nos proporciona una manera de entender lo que ocurre de un instante para otro, pero en términos espaciales salta de un lugar a otro. El segundo enunciado es local tanto en el tiempo como en el espacio, porque depende solamente de lo que ocurre en un entorno reducido. Pero ambos enunciados son matemáticamente equivalentes.

Existe aún otra manera completamente distinta de expresar la ley, distinta tanto por la filosofía que la inspira como por el tipo de ideas

a las que recurre. Acabo de mostrarles cómo se puede sortear la idea de acción a distancia si es que no les gusta. Ahora quiero presentarles una proposición que, desde el punto de vista filosófico, es justo la opuesta. Aquí no se discute en absoluto cómo se transmite el efecto de la ley de un sitio a otro; como vamos a ver, el enunciado de la ley es de carácter global. Cuando se tiene cierto número de cuerpos y se quiere saber cómo se desplaza uno de ellos de un sitio a otro, lo que se hace es inventar una posible trayectoria en un periodo de tiempo determinado (figura 13). Supongamos que el

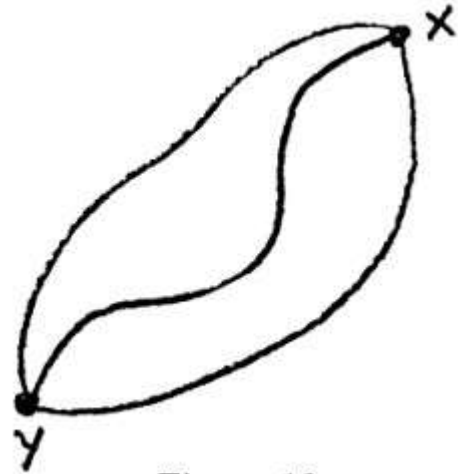


Figura 13

objeto quiere ir de X a Y en una hora y queremos saber el camino que puede seguir. Lo que hacemos es inventar varias trayectorias y calcular para cada una de ellas cierta magnitud. (No quiero decirles de qué magnitud se trata, pero, para quienes estén familiarizados con estas cuestiones, el valor correspondiente a cada camino es la media de la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial.) Si se calcula este número para dos caminos distintos obtendremos un valor diferente para cada camino. Sin embargo, existe un camino al que le corresponde el número más pequeño posible ¡y éste es el camino que realmente sigue la partícula en la naturaleza! Estamos ahora describiendo la trayectoria real, la elipse del planeta, mediante un comentario sobre la totalidad de la curva.

Hemos perdido la idea de causalidad, de que la partícula siente la atracción y se mueve en respuesta a ella. En vez de esto, y de forma ciertamente magistral, la partícula huele todas las trayectorias, todas las posibilidades, y decide la que quiere seguir (escogiendo aquella para la cual nuestro número es el mínimo).

Éste es un ejemplo de la diversidad de maneras, todas ellas hermosas, de describir la naturaleza. Cuando se nos dice que la naturaleza debe contener un elemento de causalidad, podemos usar la ley de Newton; cuando se nos dice que la naturaleza debe describirse en términos de un principio maximal o minimal, la última manera es la adecuada; o si se insiste en que la naturaleza debe describirse en términos de campos locales, bueno, pues adelante. La cuestión es: ¿cuál de estas interpretaciones es la correcta? Si estas distintas alternativas no fueran exactamente equivalentes desde el punto de vista matemático, es decir, si tuvieran consecuencias diferentes, lo que habría que hacer es determinar experimentalmente de qué forma se comporta realmente la naturaleza. Claro que, desde el punto de vista filosófico, a uno puede gustarle más una interpretación que otra; pero hemos comprobado reiteradamente que todas las intuiciones filosóficas sobre el comportamiento de la naturaleza están abocadas al fracaso. Lo único que se puede hacer es examinar todas las posibilidades, verificar todas las alternativas. Pero en el caso concreto que estamos considerando, las distintas teorías *son* exactamente equivalentes. Matemáticamente, cada una de las tres formulaciones, la ley de Newton, el método de campo local y el principio del mínimo, tiene

exactamente las mismas consecuencias. ¿Entonces qué hay que hacer? Ustedes leerán en todas partes que no es posible decidir científicamente entre unas u otras. Esto es cierto. Científicamente son ' equivalentes. Es imposible escoger entre ellas, porque si sus consecuencias empíricas son las mismas no hay forma experimental posible de distinguir unas de otras. Pero psicológicamente son muy distintas, de dos maneras: primero, desde el punto de vista filosófico unas gustan más que otras, y sólo a base de mucho entrenamiento es posible curarse de esta enfermedad; segundo, desde el punto de vista psicológico son distintas porque pierden totalmente su equivalencia cuando se trata de imaginar nuevas leyes.

Mientras la física sea incompleta e intentemos comprender nuevas leyes, las distintas formulaciones posibles pueden darnos la clave de lo que puede ocurrir en circunstancias diferentes. En este caso dejan de ser equivalentes, porque nos sugieren la forma que pueden tener las leyes de la física en un contexto más amplio. Por poner un ejemplo, Einstein advirtió que las señales *eléctricas* no podían propagarse a una velocidad superior a la de la luz. Pero intuyó que se hallaba ante un principio más general. (Se trata del mismo juego de la imaginación que consiste en tomar el momento angular y generalizarlo del caso en el que se ha demostrado el principio al resto de los fenómenos del universo.) Sospechó Einstein que se trataba de algo que era verdad en todos los casos, y por lo tanto también en el caso de la gravedad. Si las señales no pueden transmitirse a una velocidad superior a la de la luz, resulta que el método de describir las fuerzas como si actuaran instantáneamente

deja mucho que desear. Por ello, en la generalización de la gravedad debida a Einstein, la formulación de Newton resulta totalmente inadecuada y enormemente complicada, mientras que el método de campos es claro y simple, lo mismo que el principio del mínimo. Pero aún no hemos escogido entre estos dos.

Resulta que en mecánica cuántica ninguno de los dos es correcto tal como los he enunciado, pero el hecho de que exista un principio mínimo resulta ser una consecuencia de que, a pequeña escala, las partículas se comportan según los principios de la mecánica cuántica. La mejor ley, tal como se entiende en la actualidad, es en realidad una combinación de ambas, y en ella se utiliza tanto el principio del mínimo como leyes de carácter local. Actualmente creemos que las leyes de la física deben poseer tanto el carácter local como el principio del mínimo, pero en realidad no lo sabemos a ciencia cierta. Cuando se posee una estructura que sólo es correcta en parte y en la que por fuerza algo tiene que acabar fallando, si se consigue enunciar esta estructura de forma precisa con los axiomas adecuados, quizá sólo falle uno de ellos y se puedan mantener los demás, con lo que solamente habrá que cambiar una mínima parte. Pero si se enuncia con otro conjunto de axiomas puede ocurrir que todos se hundan por apoyarse precisamente en el que falla. No es posible, sin algún tipo de intuición, prever por adelantado la mejor manera de enunciar las leyes de la física. Debemos tener siempre presentes las distintas maneras de ver las cosas; por ello los físicos hacen matemáticas babilónicas y prestan poca atención a los razonamientos precisos a partir de axiomas fijos.

Uno de los rasgos más sorprendentes de la naturaleza es la cantidad de esquemas interpretativos posibles. Pero esto no sería así si las leyes no fueran tan especiales y sutiles. Por ejemplo, el que la ley se exprese como la inversa del cuadrado es lo que permite una formulación de tipo local; si fuera la inversa del cubo ya no podría ser así. En el otro extremo de la ecuación, el hecho de que la fuerza esté relacionada con la tasa de cambio de la velocidad es lo que permite enunciarla en términos del principio del mínimo. Por ejemplo, si la fuerza fuera proporcional a la tasa de cambio de la posición y no de la velocidad, entonces no podría enunciarse de esta manera. Si vamos modificando las leyes, nos encontramos con que cada vez podemos enunciarlas de menos maneras distintas. Esto siempre me ha parecido muy misterioso, y no consigo comprender por qué razón las leyes correctas de la física pueden expresarse de tantas maneras distintas. Parece como si fueran capaces de pasar por varios controles al mismo tiempo.

Me gustaría añadir algunas cosas de carácter algo más general a propósito de la relación entre las matemáticas y la física. A los matemáticos sólo les concierne la estructura del razonamiento, y les traen sin cuidado las cosas de las que están hablando. Ni siquiera les hace falta *saber* de qué están hablando ni, como ellos mismos afirman, si lo que dicen es cierto. Uno empieza por enunciar los axiomas tal y cual, y a continuación se puede proceder lógicamente sin necesidad de saber lo que tal y cual significan. Si los axiomas se enuncian de forma precisa y son lo bastante completos, a la persona que razona no le hace ninguna falta conocer el significado de las

palabras para deducir conclusiones nuevas en el mismo lenguaje. Si uso la palabra triángulo en uno de los axiomas, en las conclusiones habrá una proposición sobre triángulos, aunque la persona que razona no sepa lo que es un triángulo. Pero puedo leer su razonamiento y a partir del conocimiento de que «un triángulo no es más que una cosa con tres lados que es así y asá», saber a qué atenerme. En otras palabras, los matemáticos preparan razonamientos abstractos usables si se dispone de un conjunto de axiomas sobre el mundo real. Pero para el físico todas sus frases tienen significado. Esto es algo muy importante que muchos de los que llegan a la física desde las matemáticas no alcanzan a valorar en su justa medida. La física no es matemática, y la matemática no es física. Se ayudan mutuamente, pero en física hay que conocer la conexión de las palabras con el mundo real. Al final es necesario traducir lo hallado al lenguaje coloquial, a los pedazos de cobre y vidrio con los que uno va a realizar experimentos. Sólo de esta manera es posible saber si las consecuencias previstas son verdaderas. Este no es un problema matemático en absoluto.

Por supuesto que los razonamientos matemáticos disponibles son de gran utilidad para los físicos. Por otra parte, también a veces los razonamientos de los físicos son de gran utilidad para los matemáticos.

A los matemáticos les gusta razonar de la manera más general posible. Si les digo que me gustaría hablar de un espacio tridimensional corriente, me contestan: «Si tenemos un espacio de n dimensiones, éstos son los teoremas». «Pero sólo me interesa el caso

de tres dimensiones» «¡Bueno, pues haga $n = 3!$ » Así que muchos de sus complicados teoremas acaban siendo mucho más simples cuando se adaptan a un caso especial. Al físico siempre le interesa el caso especial, nunca el caso general. El físico habla de una cosa concreta, no le interesa hablar de forma abstracta sobre cualquier cosa. Quiere discutir la ley de la gravedad en tres dimensiones, no le interesa el caso de una fuerza arbitraria en n dimensiones. Es necesario, por lo tanto, reducir los teoremas enunciados por los matemáticos para cubrir un amplio abanico de problemas. Esto es muy útil, aunque luego resulta que el pobre físico siempre tiene que volver al matemático y decirle: «Perdóneme, pero aquello que quería usted decirme sobre las cuatro dimensiones...».

Cuando uno sabe de lo que está hablando (que unos símbolos representan fuerzas, otros masas, otros inercia, etc.) se puede hacer buen uso del sentido común, de las intuiciones sobre el mundo real. Uno ha visto ya muchas cosas y conoce más o menos la forma en que se comporta un fenómeno. Pero el pobre matemático lo traduce todo en ecuaciones y, como para él los símbolos carecen de significado, no tiene más guía en su razonamiento que el esmero y el rigor matemático. El físico, que tiene cierta idea del resultado que quiere obtener, puede ayudarse de su imaginación, lo que le permite avanzar más rápidamente. Un rigor matemático estricto es poco útil para el físico. Pero esto no es una crítica a los matemáticos. El método matemático no tiene por qué amoldarse a lo que es útil para la física. Cada cual hace su trabajo. Si queremos algo distinto, bueno, pues tenemos que construirlo nosotros mismos.

La cuestión siguiente es la de si, al imaginar una nueva ley, debemos guiarnos por la corazonada y por principios filosóficos («no me gusta el principio del mínimo» o «me gusta el principio del mínimo» o «me gusta la acción a distancia»). ¿En qué medida los modelos son una ayuda? Es interesante constatar que, en efecto, a menudo los modelos constituyen una ayuda, y la mayoría de profesores de física se esfuerza por enseñar a sus alumnos a utilizar modelos para así conseguir una buena intuición física. Pero ocurre siempre que los descubrimientos más importantes se salen del modelo, por lo que, a la postre, éste no sirve de nada. Maxwell descubrió la electrodinámica mediante la ayuda de ruedas y cojinetes imaginarios, pero se puede prescindir de todo ello sin ningún problema. Dirac⁸ descubrió las leyes de la mecánica cuántica relativista simplemente suponiendo la ecuación. El método de suponer la ecuación parece ser una manera muy efectiva de concebir nuevas leyes. Esto confirma que las matemáticas son una manera profunda de expresar la naturaleza y que cualquier intento de describir la naturaleza a partir de principios filosóficos o intuiciones puramente mecánicas no es eficiente.

Siempre me ha preocupado el hecho de que, de acuerdo con nuestro conocimiento actual de las leyes de la física, a un ordenador le cueste un número incontable de operaciones lógicas descubrir lo que ocurre en cualquier región del espacio, por pequeña que sea, y en cualquier lapso de tiempo, por pequeño que sea. ¿Cómo puede ser que en una región tan pequeña ocurran tantas cosas? ¿Por qué,

⁸ Paul Dirac, físico británico. Compartió el premio Nobel con Schrödinger, en 1933.

para saber lo que va a hacer un pequeño trocito de espacio/tiempo, se necesita un número incontable de pasos lógicos? Esta inquietud me ha llevado a menudo a proponer la hipótesis de que, en última instancia, la física no necesitará de un enunciado matemático, de que al final se nos revelará su maquinaria y las leyes resultarán ser simples, como las de una partida de damas con sus aparentes complejidades. Pero esta especulación es de la clase «me gusta, no me gusta» y no es conveniente tener demasiados prejuicios de este tipo.

Para resumir, voy a citar las palabras de Jeans cuando dijo: «El Gran Arquitecto parece ser un matemático». A aquellos que no saben matemáticas les resulta difícil sentir realmente la profunda belleza de la naturaleza. C.P. Snow habló de dos culturas. Creo que esta división ciertamente separa a la gente que ha vivido y la que no ha vivido la experiencia de entender las matemáticas lo bastante bien para comprender la naturaleza al menos una vez.

Es una pena que para ello se necesiten las matemáticas y que éstas resulten difíciles para algunos. Se dice, aunque no sé si es cierto, que un rey que estaba intentando aprender geometría guiado por Euclides se quejó de que era difícil, a lo que Euclides contestó: «No hay camino fácil hacia la geometría».⁹ Y ciertamente no lo hay. Los físicos no pueden pasarse a otro lenguaje. Si se quiere conocer la naturaleza, si se quiere captarla, es necesario conocer el lenguaje en el que nos habla. La naturaleza nos ofrece su información sólo de

⁹ Juego de palabras: el texto inglés dice royal road, camino fácil, pero también camino real. (N. del T.)

una manera, y no debemos ser tan poco humildes como para pedirle que cambie antes de prestarle atención.

Ninguno de los argumentos intelectuales que podamos proponer podrá hacer entender a unos oídos sordos lo que significa realmente la experiencia musical. De la misma manera, todos los argumentos intelectuales del mundo serán incapaces de proporcionar un conocimiento de la naturaleza a los de «la otra cultura». Los filósofos pueden intentarlo hablando de la naturaleza en términos cualitativos. Intentarán describirla, pero no lo conseguirán, porque es imposible. Quizá sea por la limitación de sus horizontes por lo que alguna gente llega a suponer que el centro del universo es el hombre.

Capítulo 3

Los grandes principios de conservación

Cuando aprendemos física descubrimos que existe un gran número de leyes complicadas y llenas de detalles: leyes de la gravedad, de la electricidad y el magnetismo, de las interacciones nucleares, etc. Pero tras el amplio abanico de estas leyes subyacen grandes principios generales que todas ellas parecen cumplir. Ejemplos de ello son los principios de conservación, ciertas propiedades de simetría, la forma general de los principios de la mecánica cuántica y, por desgracia o por fortuna, el hecho de que todas las leyes sean matemáticas. En esta conferencia quiero hablar de los principios de conservación.

Los físicos emplean los términos corrientes de manera peculiar. Para ellos una ley de conservación significa que existe un número que puede calcularse en un momento dado y que si se vuelve a calcular en un momento posterior seguirá siendo el mismo aunque la naturaleza se transforme sin cesar. Un ejemplo de esto es la conservación de la energía. Existe una magnitud que se puede calcular según cierta regla y que siempre da el mismo resultado, pase lo que pase.

Es fácil pensar que una cosa así pueda tener alguna utilidad. Supongamos que la física o, mejor, la naturaleza pueda compararse a una inmensa partida de ajedrez con millones de piezas y que intentamos descubrir las leyes del movimiento de estas piezas. Los grandes dioses que juegan esta partida lo hacen muy rápido, por lo

que resulta difícil seguir el juego. Sin embargo, poco a poco conseguimos hacernos una idea de algunas de las reglas. Por otra parte, ciertas re-

glas pueden deducirse sin necesidad de estar pendientes de cada una de las jugadas. Por ejemplo, supongamos que sobre el tablero existe solamente un alfil sobre cuadro negro. Puesto que el alfil siempre se desplaza diagonalmente y nunca pasa a un cuadro de otro color, si nos distraemos un momento mientras los dioses juegan, cabe esperar que cuando volvamos a mirar el alfil siga estando en cuadro negro; quizás en un sitio distinto, pero siempre sobre un cuadro del mismo color. Esto sería el equivalente a un principio de conservación. No hace falta, pues, hurgar en las entrañas del juego para al menos saber algo del mismo.

Es cierto que en ajedrez esta ley concreta no es absolutamente válida. Si nos distrajéramos durante mucho tiempo podría ser que el alfil fuera capturado, que un peón coronara en un cuadro blanco y que el dios encontrara preferible sustituir el peón coronado por un alfil en lugar de una dama. Desgraciadamente, podría ser que algunos de los principios que consideramos en la actualidad no sean exactos, pero voy a hablarles de ellos tal como los conocemos en el momento presente.

Ya he dicho que utilizamos palabras corrientes en un sentido técnico, y otro de los términos del título de esta conferencia es «grandes». Esta no es una palabra técnica: la he puesto ahí simplemente para conseguir un efecto teatral. Habría podido elegir como título «Los principios de conservación». Hay unos cuantos

principios de conservación que no funcionan, pues sólo se cumplen aproximadamente; pero son útiles, y podríamos llamarlos «pequeños» principios de conservación. Más adelante mencionaré uno o dos de estos principios aproximados, pero las principales leyes que voy a discutir a continuación son absolutamente precisas, al menos hasta donde alcanza nuestro conocimiento.

Empezaré con el principio más fácil de entender, el de la conservación de la carga eléctrica. Existe un número, la carga eléctrica total del mundo, que no cambia pase lo que pase. Si se pierde en un lugar, reaparece en otro. Lo que se conserva es la carga eléctrica total. Este resultado lo descubrió Faraday¹⁰ de forma experimental. El experimento consistió en meterse dentro de un gran globo metálico en el exterior del cual se había instalado un galvanómetro muy preciso con el fin de medir la carga de la esfera, teniendo en cuenta que una pequeña carga daría lugar a un efecto muy grande. En el interior del globo Faraday instaló toda clase de artefactos eléctricos, desde varillas de cristal que frotaba con pieles de gato para cargarlas hasta enormes máquinas electrostáticas, con lo que consiguió dar a su globo la apariencia de uno de esos laboratorios que salen en las películas de terror. Sin embargo, no consiguió de ninguna manera que se creara carga alguna en la superficie del globo; no produjo ninguna carga neta. Aunque la varilla de cristal adquiría carga positiva después de frotarla con la piel de gato, esta última adquiría una cantidad igual de carga negativa, con lo que la carga total era siempre cero. De haberse

¹⁰ Michael Faraday, 1791-1867, físico inglés.

creado algún tipo de carga en el interior del globo, ésta se hubiera registrado en el galvanómetro exterior. Así pues, la carga total se conserva.

Esto es fácil de entender, porque podemos explicarlo mediante un modelo no matemático muy simple. Supongamos que el mundo contiene sólo dos clases de partículas: electrones y protones (hubo un tiempo en que se pensó que todo iba a ser así de fácil). Los electrones poseen una carga negativa, mientras que los protones tienen una carga positiva, lo cual nos permite separarlos. Podemos tomar un pedazo de materia y añadirle o quitarle algunos electrones; pero si suponemos que las partículas son permanentes y nunca se desintegran ni desaparecen (ésta es una proposición muy simple que ni siquiera es matemática), entonces el número total de protones menos el número total de electrones no cambia. De hecho, en este modelo concreto, el número total de protones no cambia, como tampoco cambia el número total de electrones. Pero ahora nos estamos fijando solamente en la carga. La contribución de los protones es positiva y la de los electrones es negativa, y si estos objetos ni se crean ni se destruyen, está claro que la carga total se conserva. Quiero ir construyendo una lista con el número de propiedades que conservan sus cantidades y voy a empezar con la carga (figura 14). Ante la pregunta de si la carga se conserva escribo un sí.

	<i>Carga</i>	<i>Número bariónico</i>	<i>Extrañeza</i>	<i>Energía</i>	<i>Momento angular</i>
Conservada (localmente)	sí	sí	casi	sí	sí
Se da en unidades	sí	sí	sí	no	sí
Origen de un campo	sí	?	?	sí	

Figura 14: Tabla completa que se va construyendo a lo largo de este capítulo

Esta interpretación teórica es muy simple, pero posteriormente se descubrió que ni los electrones ni los protones son permanentes. Por ejemplo, una partícula denominada neutrón puede desintegrarse en un protón y un electrón (junto con algo más que discutiremos más adelante). Pero resulta que el neutrón es eléctricamente neutro; por ello, aunque ni los protones ni los electrones sean permanentes (en el sentido de que pueden crearse a partir de un neutrón) su carga cumple la ley. Al principio teníamos carga cero y después tenemos una carga positiva y una negativa que, sumadas, dan una carga neta nula.

Existe otra partícula, además del protón, que tiene carga positiva. Se la denomina positrón, y es parecida al electrón. En muchos aspectos es como un electrón, excepto que su carga es de signo opuesto. Se dice que es la antipartícula del electrón porque cuando ambos colisionan se desintegran y sólo queda luz. Esto quiere decir que los electrones también pueden destruirse. Un electrón más un positrón dan únicamente luz. En realidad se trata de «luz» invisible para el ojo humano (los llamados rayos gamma), aunque para el

físico es tan luz como la visible; la única diferencia es su longitud de onda. Así pues, una partícula y su antipartícula pueden aniquilarse. Sin embargo, como la luz no posee carga eléctrica, desaparece una carga positiva y una negativa, con lo que la carga total permanece constante. La teoría se complica algo, pero sigue siendo muy poco matemática: basta con sumar el número de positrones y el número de protones y restar el número de electrones. En realidad, hay muchas más partículas elementales que deben tenerse en cuenta, como los antiprotones, que aportan cargas negativas, o los mesones n^+ , que son positivos; de hecho, cada partícula fundamental tiene una carga (que puede ser cero). Lo único que hay que hacer es sumarlo todo y, ocurra lo que ocurra en cualquier reacción, la carga total de un lado tiene que compensarse con la carga total del otro.

Éste es un aspecto de la conservación de la carga. Ahora se plantea una cuestión interesante: ¿basta con decir que la carga se conserva, o hay que añadir algo más? La cantidad de carga total contenida en una caja puede conservarse de dos maneras distintas: puede ser que la carga se mueva de un sitio a otro dentro de la caja, o bien puede desaparecer de un sitio y aparecer simultáneamente en otro, de manera que la carga total nunca cambie. Esta segunda posibilidad de conservación es de distinta naturaleza que la primera, porque si una carga desaparece de un sitio y reaparece en otro, algo tiene que haberse trasladado. Esta segunda forma de conservación de la carga es lo que se llama conservación de la carga local, y es mucho más detallada que la simple observación de que la carga total se mantiene constante. Si realmente se confirma que la

carga se conserva localmente, entonces habremos mejorando nuestra ley. De hecho ocurre así. De vez en cuando intento mostrarles algunas posibilidades de razonamiento, cómo conectar entre sí varias ideas, y a continuación me gustaría describir para ustedes un argumento, debido fundamentalmente a Einstein, que indica que si algo se conserva (y en esta ocasión lo aplico al caso de la carga) debe conservarse también localmente. Este argumento se basa en el hecho de que si dos personas en sendos vehículos interplanetarios se cruzan en el espacio, la cuestión de quién se mueve y quién está parado no puede resolverse experimentalmente. Este es el llamado principio de relatividad, según el cual el movimiento uniforme y rectilíneo es relativo y podemos observar cualquier fenómeno desde uno u otro punto de vista sin que seamos capaces de decidir qué cuerpos se mueven y cuáles no.

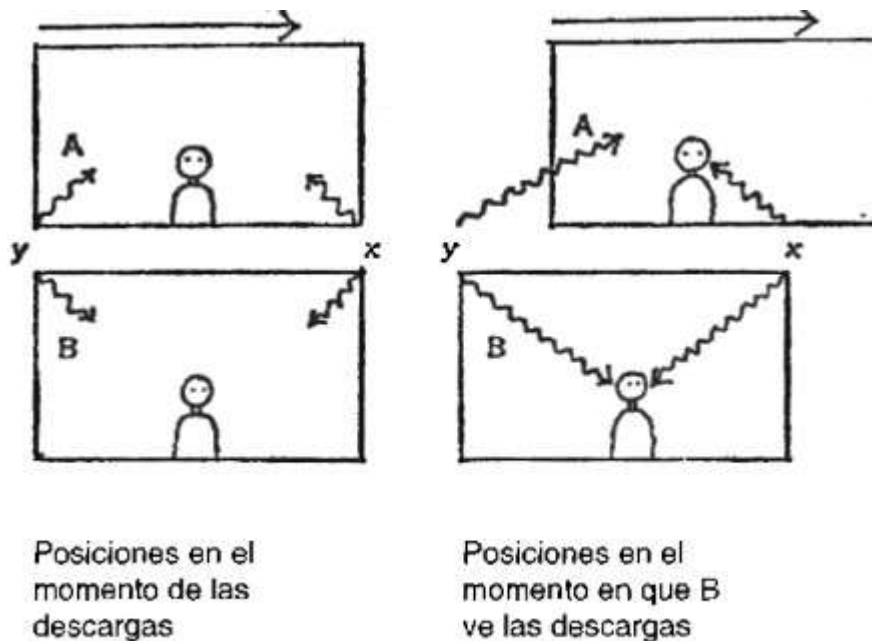


Figura 15

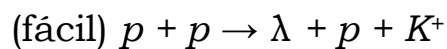
Supóngase que tenemos dos vehículos espaciales, A y B (figura 15). Voy a adoptar el punto de vista de que A es el que se mueve mientras que B permanece quieto. Recuérdese que esto no es más que una opinión, porque también puede verse todo al revés y seguiremos obteniendo los mismos fenómenos naturales. Supóngase también que la persona que está parada quiere discutir si ha visto o no desaparecer una carga eléctrica en un extremo de la nave y aparecer simultáneamente en el otro extremo. Para estar seguro de que ambos fenómenos son simultáneos, el sujeto en cuestión no puede sentarse en la proa o la popa de su nave porque, dado que la luz necesita cierto tiempo para desplazarse de un sitio a otro, vería desaparecer una carga antes de aparecer la otra, o al revés. Supongamos, pues, que es extremadamente cuidadoso y se sienta justo en el centro de la nave. Al mismo tiempo, la otra persona hace el mismo experimento en el otro vehículo. De pronto cae un rayo que crea carga eléctrica en el punto x, al mismo tiempo que en el punto y, situado en el otro extremo de la nave, la carga se aniquila, desaparece. Obsérvese que decimos al mismo tiempo, de manera totalmente consistente con nuestra idea de que la carga se conserva. Si perdemos un electrón en un sitio, obtenemos un electrón en otro, sin que nada ocurra en medio. Supongamos también que tanto la creación como la desaparición de carga produce una chispa, de forma que podemos observar lo que ocurre. B dice que ambos fenómenos ocurren simultáneamente, puesto que está sentado en el centro de la nave y la luz del rayo que crea la

carga en x le llega al mismo tiempo que la chispa que indica la desaparición de la carga en y . B dirá: «Efectivamente, cuando desaparece una surge otra». Ahora bien, nuestro amigo en la otra nave dice: «No, hombre, no, te equivocas; he visto la luz en x antes que en y ». Esto ocurre porque se está acercando a x a la vez que se aleja de y , por lo que la luz que sale de x tendrá que recorrer una distancia menor que la que sale de y . A podría decir: «Primero se creó carga en x y luego desapareció en y , por lo que durante un corto lapso de tiempo, antes de que la carga creada en x desapareciera en y , ha habido alguna carga adicional; esto va en contra de la ley de conservación». A lo que el otro puede responder: «Sí, pero tú te estás moviendo». A lo que el segundo puede replicar: «¿Cómo lo sabes? Para mí eres tú el que se mueve», y así sucesivamente. Si no existe experimento alguno que nos permita observar diferencias en las leyes de la física que dependan de si nos movemos o no, entonces una ley de conservación de la carga no local sólo podría ser comprobada por ciertas personas, a saber, aquellas que estuvieran quietas en un sentido absoluto. Pero, de acuerdo con la teoría de la relatividad de Einstein, esto es imposible, de manera que es imposible tener una ley no local de conservación de la carga. El carácter local de la conservación de la carga está en consonancia con la teoría de la relatividad y resulta ser común a todas las leyes de conservación. Es fácil darse cuenta de que puede aplicársele el mismo principio a cualquier cosa que se conserve. Existe otro hecho interesante a propósito de la carga, algo muy extraño para lo cual todavía no tenemos explicación en realidad. Es

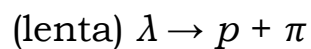
algo que no tiene nada que ver con la ley de conservación. La carga siempre se da en unidades. Una partícula cargada siempre tiene una o dos cargas unidad, o menos una o menos dos. Volviendo a nuestro cuadro, aunque no tenga nada que ver con la conservación de la carga, quiero hacer notar que todo lo que se conserva se da en unidades. Es una suerte, porque esto hace que la teoría de la conservación de la carga sea muy fácil de entender. Es sólo una *cosa* que podemos contar y que se desplaza de un sitio a otro. Al final resulta que, desde el punto de vista técnico, la carga total de un objeto es fácil de determinar eléctricamente, porque la carga posee una característica muy importante: es el origen del campo eléctrico y magnético. La carga es la medida de la interacción de un objeto con la electricidad, con un campo eléctrico. De manera que otro apartado que conviene incluir en nuestra lista es que la carga es el origen de un campo; en otras palabras, la electricidad está relacionada con la carga. Así pues, la magnitud concreta que en este caso se conserva tiene otras dos facetas que, aunque no relacionadas directamente con la ley de conservación, son interesantes. Una es que se da en unidades, y la otra es que origina un campo.

Existen muchas leyes de conservación, y voy a dar más ejemplos de leyes del tipo de la conservación de la carga, en el sentido de que en todos estos casos se trata solamente de contar. Existe una ley de conservación de los bariones. Un neutrón puede transformarse en un protón; si damos un valor unidad a cada uno de ellos y llamamos a esta unidad barión, resulta que el número de bariones

no cambia. El neutrón posee una unidad de carga bariónica, es decir, representa un barión, lo mismo que un protón (¡lo único que hacemos es contar e inventar términos pretenciosos!), de manera que si tiene lugar la reacción de descomposición de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino, el número total de bariones no cambia. Pero en la naturaleza ocurren muchas más reacciones. Un protón más otro protón pueden dar lugar a una gran variedad de objetos raros, por ejemplo un lambda, un protón y un K^+ . Lambda y K^+ son los nombres de unas partículas peculiares.



En esta reacción sabemos que al principio hay dos bariones y al final sólo uno, de lo que deducimos que seguramente lambda o K^+ representan un barión. Si a continuación estudiamos el lambda, descubrimos que muy lentamente se desintegra en un protón y un pi, y por último el pi se desintegra en electrones y más cosas.



Lo que vemos aquí es el barión que reaparece en forma de protón, de lo que concluimos que lambda tiene un número bariónico 1, mientras que K^+ tiene un número bariónico cero.

En nuestro cuadro de leyes de conservación (figura 14), además de la carga tenemos una situación similar en el caso de los bariones, con una regla especial que indica que el número de bariones es

igual al número de neutrones, más el número de protones, más el número de lambdas, menos el número de antiprotones, menos el número de antineutrones,

etc. Se trata, simplemente, de una proposición que indica una forma de contar. Se conserva, se da en unidades y, aunque nadie lo sabe, todo el mundo quiere creer, por analogía, que es el origen de un campo. La razón por la cual construimos estos cuadros es la de intentar adivinar las leyes de las interacciones nucleares, y ésta es una de las formas rápidas de descifrar la naturaleza. Si la carga es origen de un campo y el barión se comporta de modo parecido, cabe esperar que éste sea también origen de un campo. Es una lástima que de momento no parezca serlo, aunque esto no puede darse por seguro todavía.

Existen unas pocas proposiciones contables de este tipo, como la relativa al número de leptones, pero la idea es la misma que en el caso de los bariones. Sin embargo, hay una que es un poco distinta. Las reacciones entre todas las partículas extrañas que se dan en la naturaleza varían desde muy rápidas y fáciles hasta muy lentas y dificultosas. No quiero decir que sean fáciles o difíciles en sentido técnico, a la hora de experimentar con ellas. Me refiero a las velocidades a las que tienen lugar las reacciones cuando las partículas están presentes. Hay una diferencia clara entre los dos tipos de reacciones que he mencionado antes: la desintegración de un par de protones y la desintegración mucho más lenta de la partícula lambda. Si consideramos sólo las reacciones rápidas y fáciles, existe otra ley contable según la cual a lambda se le asigna

un -1 mientras que K^+ recibe un $+1$ y al protón le corresponde un cero. A esto se le llama número de extrañeza. Pues bien, resulta que la conservación se verifica en todas las reacciones rápidas pero no en las lentas. En nuestro cuadro (figura 14) debemos añadir la ley de conservación de la extrañeza, que es casi correcta. Esto la convierte en una magnitud muy peculiar, lo cual justifica su nombre. Es casi cierto que se conserva y cierto del todo que se da en unidades. Al intentar comprender las interacciones fuertes implicadas en las fuerzas nucleares, el hecho de que la cosa se conserve en ese tipo de interacciones ha llevado a proponer que también es origen de un campo, aunque una vez más no lo sabemos con certeza. Digo esto para mostrarles cómo pueden utilizarse los principios de conservación para entrever nuevas leyes.

Otras leyes de conservación que se han propuesto en algún momento también se basan en contar. Por ejemplo, en química se llegó a creer que, pasara lo que pasara, el número de átomos de sodio se conservaba. Pero los átomos de sodio no son permanentes. Es posible transmutar átomos de un elemento en otro de manera que desaparezca completamente el elemento inicial. Otra ley que durante un tiempo se creyó cierta era la de que la masa total de un objeto se mantenía constante. Pero esto depende de la definición de masa y de hasta qué punto se considere algo distinto de la energía. La ley de conservación de la masa está incorporada en la próxima ley que voy a considerar, el principio de conservación de la energía. De todas las leyes de conservación, la de la energía es la más difícil y abstracta y, a pesar de ello, la más útil. Es más difícil de

comprender qué las anteriores, porque en los otros casos el mecanismo no plantea problemas: se trata más o menos de la conservación de objetos. Esto no es exactamente así, porque en algunos casos obtenemos cosas nuevas a partir de otras, pero básicamente es una cuestión de echar cuentas.

La conservación de la energía es un tema más difícil, porque en este caso estamos considerando un número que no cambia con el tiempo, pero que no representa nada en particular. Me gustaría hacer una analogía más bien tonta para explicar un poco esto.

Imaginemos que una madre deja a su hijo en una habitación en la que hay 28 bloques absolutamente indestructibles. El niño juega con los bloques durante todo el día, y cuando la madre vuelve a la habitación comprueba que, efectivamente, continúa habiendo 28 bloques. Todo sigue igual durante varios días, hasta que un buen día la madre se encuentra al regresar con que sólo hay 27 bloques; pero acaba descubriendo que el bloque que falta está al otro lado de la ventana, seguramente arrojado allí por el niño. Conviene, pues, tener claro de entrada que en las leyes de conservación hay que estar seguro de que lo que uno está observando no puede escurrirse por las ventanas o a través de las paredes. Lo mismo podría ocurrir en sentido inverso si un amigo viniera a jugar con nuestro niño trayendo consigo más bloques. Es obvio que éstas son cuestiones que hay que tener en cuenta cuando se habla de leyes de conservación. Ahora supongamos que otro día la madre cuenta sólo 25 bloques, pero sospecha que el niño ha escondido los tres que faltan en su caja de juguetes. La madre le dice al niño que va a abrir

la caja, y el niño le contesta que no se puede abrir. Pero como la madre es muy lista, le dice al niño: «Sé que la caja vacía pesa 1600 gramos y, como cada bloque pesa 300 gramos, lo que voy a hacer es pesar la caja». Teniendo en cuenta el número de bloques que ha contado, hace el siguiente cálculo:

$$N.º \text{ de bloques contados} + \frac{\text{Peso de la caja} - 1600 \text{ gramos}}{300 \text{ gramos}}$$

y obtiene 28. Durante un tiempo obtiene el resultado apetecido, hasta que un día no le salen las cuentas. Sin embargo, comprueba que el nivel de agua sucia en la pila parece distinto. Sabe que la profundidad del agua es normalmente de 12 centímetros, y que de haber un bloque sumergido en ella el nivel subiría 1/2 centímetro. Así pues, añade otro término a su cálculo:

$$N.º \text{ de bloques vistos} + \frac{\text{Peso de la caja} - 1600 \text{ gramos}}{300 \text{ gramos}} + \frac{\text{Alt. agua} - 12 \text{ cm}}{1/2 \text{ cm}}$$

y de nuevo obtiene 28. A medida que el niño idea cosas nuevas, la madre, igualmente ingeniosa, va añadiendo términos a su suma, todos los cuales representan bloques, aunque desde el punto de vista matemático se trata de cálculos abstractos, puesto que estos bloques no son visibles.

Quisiera concluir mi analogía indicando lo que tiene en común este ejemplo con la conservación de la energía y lo que no. En primer lugar, supongamos que en ninguna de las situaciones anteriores se ven los bloques. El término «Nº de bloques vistos» no aparece nunca, de manera que la madre estará siempre calculando toda una serie de expresiones como «bloques en la caja», «bloques en el agua», etc. Con respecto a la energía hay, sin embargo, algo distinto, y es que, según parece, no existen bloques. Además, a diferencia de nuestro ejemplo, los números correspondientes a la energía no tienen por qué ser enteros. Habría que suponer, pues, que la madre pudiera obtener un valor de $61/8$ bloques para un término y $7/8$ de bloque para otro, lo que sumado a los 21 restantes daría los 28 correspondientes. Esto es lo que ocurre con la energía.

Lo que hemos descubierto respecto a la energía es que poseemos un esquema con una sucesión de reglas. A partir de cada conjunto diferente de reglas podemos calcular un número para cada clase distinta de energía; y cuando sumamos todos estos números, cada uno correspondiente a una clase distinta de energía, siempre obtenemos el mismo total. Pero no parece que existan unidades reales, como pequeñas bolitas. Es un hecho abstracto, puramente matemático, el que exista un número tal que siempre que se calcula da el mismo resultado. No puedo interpretarlo de mejor manera.

Esta energía tiene multitud de formas: se presenta como bloques en la caja, como bloques en el agua, etc. Existe energía ligada al movimiento, llamada energía cinética, energía ligada a la gravedad, llamada energía potencial gravitatoria, energía térmica, energía

eléctrica, energía luminosa, energía elástica en los muelles, energía química, energía nuclear, y también una energía que cada partícula tiene por el mero hecho de existir y que depende directamente de su masa. Ésta es una aportación de Einstein, como todos ustedes seguramente saben. $E = mc^2$ es la famosa ecuación de la ley de la que estoy hablando.

Aunque he hablado de un gran número de energías, hay que decir que no somos totalmente ignorantes al respecto, puesto que comprendemos algunas de las relaciones entre ellas. Por ejemplo, lo que llamamos energía térmica es, en gran medida, simplemente la energía cinética del movimiento de las partículas dentro de un objeto. La energía elástica y la energía química tienen el mismo origen, las fuerzas entre los átomos. Cuando los átomos se reordenan se produce un cambio de energía, y esto significa que otra cantidad debe también cambiar. Por ejemplo, si quemamos algo la energía química cambia y nos encontramos con que ahora hay calor donde no lo había, porque todo tiene que compensarse. Tanto la energía elástica como la energía química son interacciones entre átomos, y hoy sabemos que estas interacciones son combinaciones de dos cosas: energía eléctrica y, de nuevo, energía cinética, con la única diferencia de que ahora la fórmula es mecano-cuántica. La energía lumínica no es más que energía eléctrica, porque la luz se interpreta en la actualidad como una onda electromagnética. La energía nuclear no se representa en términos de las demás; por el momento sólo puedo decir que se origina en las fuerzas nucleares; y no estoy hablando sólo de la energía liberada. El núcleo de uranio

contiene cierta cantidad de energía, y cuando éste se desintegra la cantidad de energía que resta en el núcleo cambia, pero no así la cantidad total de energía que hay en el mundo, por lo que, para mantener dicha constancia, en el proceso de desintegración se genera una gran cantidad de calor y otras cosas.

Esta ley de conservación es muy útil por diversas razones técnicas. Les voy a dar algunos ejemplos muy simples para mostrarles que, sabiendo que la energía se conserva y las fórmulas para calcularla, podemos descubrir otras leyes. En otras palabras, hay muchas otras leyes que no son independientes del principio de conservación de la energía, sino formas encubiertas de expresarlo. La más simple es la ley de la palanca (figura 16).

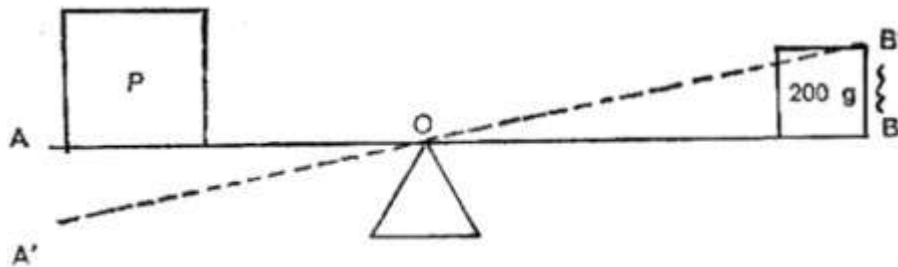


Figura 16

Tenemos una palanca y un punto de apoyo. La longitud de un brazo es de 10 cm y la del otro de 40 cm. Para empezar, tengo que aplicar la ley de la energía gravitatoria: si tenemos una serie de objetos, hay que medir el peso de cada uno de ellos, multiplicarlo por la altura del objeto respecto del suelo y sumar todos los resultados parciales para obtener la energía gravitatoria total. Supongamos que sobre el brazo más largo tenemos un peso de 200 g, y sobre el otro brazo un

peso esotérico desconocido (como X es siempre la incógnita, llamémosle P para que parezca que sabemos algo). Ahora nuestro problema es: ¿qué valor debe tener P para que el sistema quede en equilibrio, oscilando suavemente arriba y abajo? Si se mueve así, ello quiere decir que la energía es la misma tanto si la palanca está paralela al suelo como si está inclinada de manera que el objeto de 200 g esté a 1 cm por encima del suelo, por ejemplo. Si la energía es la misma, entonces no importa en qué sentido se muevan los brazos. Si el peso de 200 g sube 1 cm, ¿cuánto debe bajar P ? En la figura puede observarse (figura 16) que si AO tiene 10 cm y OB tiene 40 cm, entonces AA' debe tener $1/4$ cm cuando BB' tiene 1 cm. Apliquemos a continuación la ley de la energía gravitatoria. Antes de que nada ocurriera las alturas eran cero, de manera que la energía total era cero. Después de la inclinación, para obtener la energía gravitatoria multiplicamos el peso de 200 g por la altura de 1 cm y a este número le sumamos el producto de P por la altura de $1/4$ cm. Esta suma debe darnos la misma energía que antes, es decir, cero. Así pues,

$$200 - P/4 = 0, \text{ de donde } P = 800.$$

Ésta es una manera de entender una ley muy simple, una ley que por descontado todos ustedes conocen, la ley de la palanca. Pero es interesante constatar que no sólo ésta, sino cientos de otras leyes de la física, pueden estar estrechamente relacionadas con varias

formas de energía. Les he ofrecido este ejemplo para ilustrar la utilidad de esto.

La única pega, claro está, es que en la práctica la cosa no funciona realmente así debido a la fricción. Si tenemos algo que se mueve, como una bola deslizándose sobre un plano horizontal, ésta acabará parándose debido a la fricción. ¿Qué habrá ocurrido con la energía cinética de la bola? La respuesta es que la energía del movimiento de la bola se ha convertido en energía cinética de los átomos del plano y la bola. En nuestro mundo a gran escala vemos una hermosa bola bien pulida, pero en cuanto la miramos a pequeña escala resulta ser hartó complicada: miles de millones de átomos con toda clase de formas extrañas. La bola es como una gran roca cuando se observa con sumo detalle. Lo mismo puede decirse de la superficie del plano. Cuando hacemos rodar la roca gigante sobre la superficie ampliada, es fácil imaginar que los pequeños grumos de ambas superficies (los átomos) experimentan sacudidas. Cuando la bola ha pasado rodando, los átomos que han quedado atrás todavía vibran un poco debido a los tirones y empujones recibidos, de manera que sobre la superficie queda una cierta agitación remanente, la energía térmica. A primera vista podría parecer que la ley de la conservación de la energía no se cumple, pero la energía tiene la mala costumbre de esconderse, por lo que necesitamos termómetros y otros instrumentos para comprobar que no ha desaparecido. De esta manera descubrimos que la energía se conserva por muy complejo que sea el proceso en cuestión, y aunque desconozcamos en detalle las leyes que están en juego.

La primera demostración de la ley de conservación de la energía la efectuó no un físico, sino un médico. Para ello se sirvió de ratas. Si se quema comida se puede medir la cantidad de calor generado. Demos ahora la misma cantidad de comida a unas cuantas ratas, que la convierten en dióxido de carbono, igual que si se quemara. Si se mide la energía en ambos casos se comprueba que los seres vivos hacen exactamente lo mismo que los inanimados. La ley de la conservación de la energía es tan cierta para la vida como para los demás fenómenos. A propósito, no deja de ser interesante que cada una de las leyes o principios que conocemos sobre las cosas «muertas», y que podemos verificar en el gran fenómeno de la vida, también funcionen en este último caso. No existe indicio alguno, todavía, de que los fenómenos que ocurren en los seres vivos sean necesariamente distintos, en lo que atañe a las leyes físicas, de los que ocurren en la materia inanimada, aunque los seres vivos pueden ser mucho más complicados.

La cantidad de energía contenida en los alimentos, que nos indica la cantidad de calor, de trabajo mecánico, etc., que son capaces de generar, se mide en calorías. Las calorías no son cosas que comemos, sino que se trata simplemente de la medida de la cantidad de energía calorífica contenida en la comida. Los físicos suelen dárselas de listos, por lo que al resto de los mortales les encantaría poder dejarlos en evidencia de vez en cuando. Pues bien, voy a decirles cómo conseguirlo: los físicos deberían avergonzarse de medir la energía de mil maneras distintas, con un nombre diferente para cada caso. Resulta absurdo que la energía se mida en calorías,

ergios, electronvoltios, kilográmetros, caballos de vapor hora, kilovatios hora, etc., siendo siempre la misma cosa. Es como tener dinero en dólares, pesetas y demás. Pero, al contrario de lo que ocurre en la economía, donde se permite que los tipos de cambio varíen, las relaciones entre todas esas absurdas unidades se mantienen invariables. En realidad, la analogía sería con los duros y las pesetas. Siempre hay cinco pesetas en un duro. Pero una complicación que se permiten los físicos es que, en vez de operar con números como el 5, utilizan números irracionales del tipo de 1,6183178 pesetas por duro. Uno pensaría que al menos los físicos teóricos más modernos utilizan una misma unidad. Pues no; encontramos artículos donde la energía se mide unas veces en grados Kelvin y otras en megaciclos o, el último invento, en Fermis inversos. Quienes busquen una prueba de que los físicos son seres humanos, la tienen en la idiotez del cúmulo de unidades que utilizan para medir la energía.

Hay una serie de curiosos fenómenos naturales que nos plantean problemas con respecto a la energía. Pienso, por ejemplo, en el descubrimiento de unos objetos llamados cuásares, situados a distancias enormes de nosotros, que irradian tal cantidad de energía en forma de luz y ondas de radio que se plantea el interrogante de su fuente. Si el principio de conservación de la energía es correcto, el estado de un cuásar después de irradiar esta enorme cantidad de energía debe ser distinto de su estado anterior. La cuestión es si esta energía es de origen gravitatorio, y una vez el objeto ha experimentado un colapso gravitatorio cambia su energía

potencial gravitatoria, o bien es de origen nuclear. En realidad nadie lo sabe. Quizás a alguien se le ocurra proponer que la ley de la conservación de la energía no es del todo correcta. Lo cierto es que cuando nos hallamos ante un objeto poco investigado (téngase en cuenta que los cuásares se hallan a tales distancias que su observación resulta muy difícil) y que parece estar en conflicto con una ley fundamental, es muy raro que sea la ley fundamental la que falla; lo que suele ocurrir es que nos faltan detalles por conocer.

Otro ejemplo interesante del uso de la ley de conservación de la energía es el de la reacción de desintegración de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino. Al principio se creyó que el neutrón se descomponía en un protón más un electrón. Pero al medirse la energía de estas partículas se observó que su suma era menor que la energía del neutrón. Había, por lo tanto, dos posibilidades: o bien se incumplía la ley de la conservación de la energía (de hecho, durante un tiempo Bohr¹¹ sugirió que quizás el principio de conservación de la energía era sólo una ley estadística) o bien la suma de energías era inferior a la esperada porque faltaba algo en el balance. Esta partícula producto de la desintegración del neutrón, lo que hoy se conoce como antineutrino, completa el balance de energía. Podría pensarse que la única razón de la existencia del antineutrino es hacer que se cumpla la ley de la conservación de la energía; pero no es así, porque al mismo tiempo hace que se cumpla la ley de conservación del momento y otras

¹¹ Niels Bohr, físico danés.

leyes de conservación. Por otra parte, su existencia ha sido demostrada recientemente de forma directa.

Este ejemplo sirve para ilustrar la siguiente cuestión: ¿cómo es posible que podamos extender nuestras leyes a regiones sobre las que sabemos tan poco? ¿De dónde procede nuestra confianza en que, una vez verificada la conservación de la energía en nuestro entorno, cualquier fenómeno nuevo también cumplirá la ley de conservación de la energía? De vez en cuando uno lee en la prensa que se ha descubierto que una de las leyes favoritas de la física ha resultado ser incorrecta. ¿Es, pues, temerario afirmar que una ley se cumple en una región aún no observada? Pero si nunca se afirma que una ley es cierta en una región inexplorada, entonces es que no se sabe nada. Si las únicas leyes en que confiamos son aquellas que acabamos de verificar, entonces nunca podremos hacer predicciones. En realidad, la única utilidad de la ciencia es la de hacer predicciones y conjeturas. Por ello continuamente nos la estamos jugando, y en el caso concreto de la energía lo más probable es que también se conserve en otros lugares.

Esto significa, por descontado, que la ciencia es incierta; desde el momento en que nos permitimos hacer afirmaciones sobre regiones de nuestra experiencia que no hemos observado directamente, corremos el peligro de equivocarnos. Pero siempre estamos haciendo afirmaciones de este tipo, de lo contrario todo el asunto no tendría objeto. Por ejemplo, la conservación de la energía obliga a que la masa de un cuerpo cambie al moverse. Debido a la relación entre masa y energía, la energía relacionada con el movimiento adquiere

el aspecto de una masa adicional, con lo que los objetos se hacen más pesados al moverse. Newton creía que esto no era cierto y que las masas se mantenían constantes. Cuando se descubrió la falsedad de esta idea, todo el mundo proclamó lo terrible que era que los físicos hubieran descubierto que estaban equivocados. ¿Por qué creían que Newton tenía razón? Porque el efecto es muy pequeño y sólo se aprecia a velocidades cercanas a la de la luz. Si pesamos una peonza en reposo y en movimiento, la diferencia es inapreciable. ¿Habrá que decir entonces que «si la velocidad no es mayor que tanto, la masa no cambia»? La respuesta es que no, porque si el experimento se hubiese efectuado sólo con peonzas de madera, cobre y acero, habríamos tenido que decir «con peonzas de madera, cobre y acero, moviéndose a una velocidad inferior a...». Nunca conocemos todas las condiciones que debemos tener en cuenta a la hora de hacer un experimento. No sabemos si una peonza radiactiva tendría una masa constante. Por ello, para que la ciencia tenga alguna utilidad debemos estar siempre haciendo conjeturas. Para no caer en la mera descripción de los experimentos que hemos efectuado, tenemos que proponer leyes que trasciendan lo observado; y no hay nada malo en ello, a pesar de que la ciencia se convierta en algo incierto. Si alguno de ustedes ha pensado en algún momento en la certeza de la ciencia, bueno, pues estaba equivocado.

Volviendo a nuestra lista de las leyes de conservación (figura 14), podemos añadir la de la energía. Hasta donde sabemos, se conserva perfectamente. Por otra parte, la energía no se presenta en unidades

enteras. La siguiente pregunta es si origina un campo. La respuesta es que sí. Einstein entendió la gravedad como generada por energía. La energía y la masa son equivalentes, con lo que la afirmación de Newton de que la gravedad emana de la masa se ha modificado diciendo que es la energía la que produce la gravedad.

Hay otras leyes similares, en sentido numérico, a la de la conservación de la energía. Una es la del momento lineal o impulso. Si tomamos todas las masas de un objeto y las multiplicamos por sus velocidades, su suma es el impulso de sus partículas; y la cantidad total de impulso se conserva. Hoy día se considera que el impulso y la energía están íntimamente relacionados, por lo que las he puesto en la misma columna de nuestro cuadro.

Otro ejemplo de conservación de una magnitud es el momento angular, un concepto del que ya he hablado. El momento angular es el área por unidad de tiempo generada por los objetos en movimiento.

Si tenemos, por ejemplo, un objeto en movimiento y tomamos un centro cualquiera, resulta que la velocidad a la que crece el área definida por una línea trazada desde el centro hasta el objeto (figura 17)

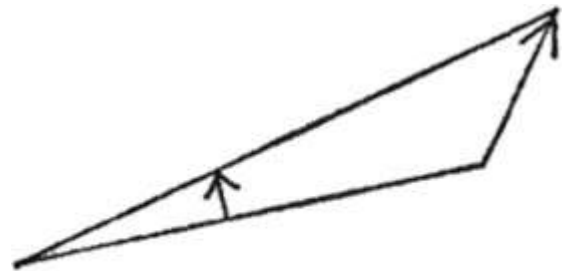


Figura 17

multiplicada por la masa del objeto, y sumada para todos los objetos, se denomina momento angular. Pues bien, esta cantidad no cambia, de manera que tenemos un principio de conservación del momento angular. Aunque, a primera vista, si alguno de ustedes

sabe mucha física podrá pensar que el momento angular no se conserva. Al igual que la energía, adopta distintas formas. En contra de lo que mucha gente piensa, no sólo aparece cuando hay movimiento. Por ejemplo, si tenemos un alambre y le acercamos un imán de manera que aumente el flujo magnético a través del alambre, obtendremos una corriente eléctrica (así es como funcionan los generadores).

Imaginemos que en lugar de un alambre tenemos un aro sobre el cual hay cargas eléctricas análogas a los electrones del alambre (figura 18). Si ahora introduzco un imán desde lejos siguiendo un eje central perpendicular al aro y en un movimiento rápido, se produce un cambio de flujo. Al igual que en el alambre, las cargas comenzarán a moverse, de manera que, si el aro se halla sobre una rueda, ésta se pondrá a girar cuando la atraviese con mi imán. No parece que estemos ante un caso de conservación del momento angular, porque cuando el imán está lejos del aro éste no se mueve, mientras que se pone a girar en cuanto se aproxima. Tenemos un giro a partir de nada, y esto es contrario a las reglas. Alguien dirá: «Muy bien, pero seguro que hay algún otro tipo de interacción que hace girar al imán en dirección contraria». Pues no, no ocurre nada de esto. No existe fuerza eléctrica alguna en el imán que tienda a hacerlo girar en sentido opuesto. La explicación reside en que el momento angular aparece en dos formas distintas: una asociada al movimiento y otra

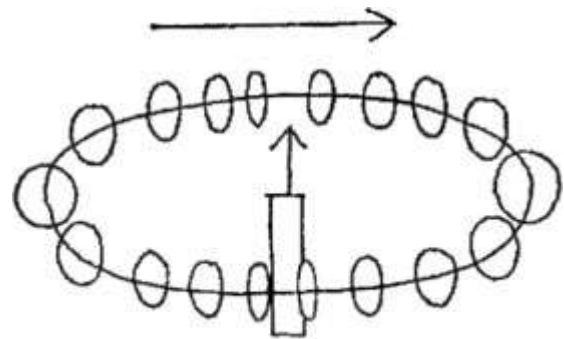


Figura 18

asociada a los campos eléctrico y magnético. Existe momento angular en el campo alrededor del imán, aunque no se presenta en forma de movimiento, y tiene signo opuesto al giro del aro. Esto resulta aún más claro si nos fijamos en el caso contrario (figura 19).

Si tenemos el imán junto a las partículas y todo lo demás está quieto, podemos decir que existe momento angular en el campo, una forma oculta de momento angular que no se presenta en forma de rotación real. Cuando alejamos el

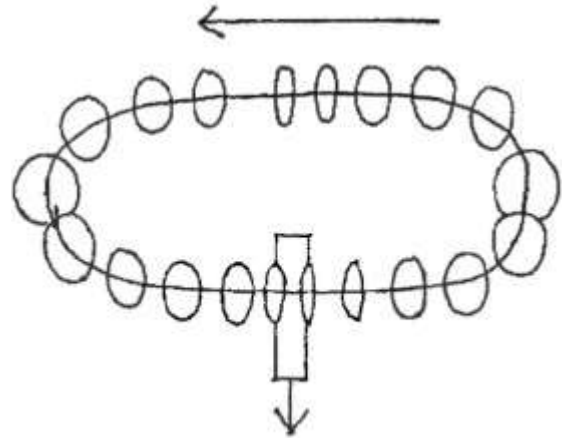


Figura 19

imán, los campos se separan y el momento angular tiene que aparecer en forma de giro del aro. La ley que lo hace girar es la ley de la inducción electromagnética.

Es difícil para mí decir si el momento angular se presenta en unidades. A primera vista parece del todo imposible, porque el momento angular depende de la dirección en la que se proyecte la figura. Como lo que hacemos es mirar un área, parece obvio que ésta será distinta según se mire desde arriba o lateralmente. Si el momento angular se diera en unidades y si, por ejemplo, en una medición diera 8 unidades, resultaría que al medirlo desde un ángulo apenas distinto el número de unidades sería también apenas diferente, quizás algo menos que 8. Pero 7 no es algo menos que 8, es bastante menos que 8. Así pues, no parece que el momento angular pueda presentarse en unidades enteras. Sin embargo, las

sutilezas de la mecánica cuántica permiten eludir este argumento: si medimos el momento angular desde cualquier eje, con gran sorpresa, resulta ser siempre un número entero de unidades. No se trata, sin embargo, de unidades contables, como la carga eléctrica. Decimos que el momento angular se da en unidades en el sentido matemático de que el número que obtenemos en cualquier medición es un múltiplo entero de cierta unidad. Pero esto no puede interpretarse igual que las unidades de carga eléctrica, es decir, como unidades imaginables que podemos contar: primero una, luego otra y otra. En el caso del momento angular no podemos imaginarlas como unidades separadas, aunque siempre obtenemos un número entero de unidades..., lo que no deja de ser extraño.

Hay otras leyes de conservación. No son tan interesantes como las que acabo de discutir, y no se refieren exactamente a la conservación de números. Supongamos que tenemos cierto tipo de aparato con partículas que se mueven con simetría bilateral (figura

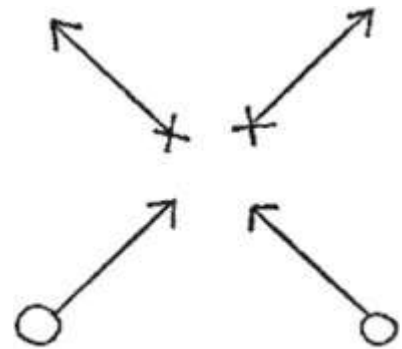


Figura 20

20). Siguiendo entonces las leyes de la física, con todos sus movimientos y colisiones, habría que esperar que, si se vuelve a observar al cabo de un tiempo, el sistema conservara la simetría bilateral. Nos hallamos, pues, ante un cierto tipo de conservación, la conservación del carácter simétrico. Así pues, deberíamos incluir esta ley en nuestro cuadro, pero no se trata de un número medible. Discutiré este asunto con mucho más detalle en la próxima

conferencia, pero la razón de que éste no sea un resultado demasiado interesante en física clásica es que raramente nos encontramos con unas condiciones iniciales perfectamente simétricas. Pero en mecánica cuántica, al tratar con sistemas tan simples como los átomos, cuya constitución interna suele poseer cierta simetría, bilateral o de otro tipo, la conservación del carácter simétrico se convierte en una ley importante para entender los fenómenos cuánticos.

Una cuestión interesante es si existe una base más profunda para estas leyes de conservación o si, simplemente, tenemos que aceptarlas tal como son. Voy a dedicar la próxima conferencia a este tema, pero ahora quiero señalar lo siguiente. Al discutir estas cuestiones a nivel popular, parece que haya un montón de conceptos no relacionados entre sí. Pero cuando se tiene una comprensión más profunda de estos principios aparecen profundas interconexiones entre los distintos conceptos, y cada uno implica de alguna manera los demás. Un ejemplo es la relación entre la relatividad y la necesidad de conservación local. De haber establecido esta relación sin demostrarla, hubiera resultado inverosímil o milagroso que el hecho de no poder decir a qué velocidad nos movemos implique que si algo se conserva debe hacerlo sin saltar de un sitio a otro.

Llegados a este punto, quisiera indicar de qué manera la conservación del momento angular, la conservación del impulso y algunas cosas más están hasta cierto punto relacionadas. La conservación del momento angular tiene que ver con el área

cubierta por partículas en movimiento. Si se tienen muchas partículas (figura 21) y tomamos como origen un punto muy alejado x , las distancias resultan ser aproximadamente las mismas para todos los objetos.

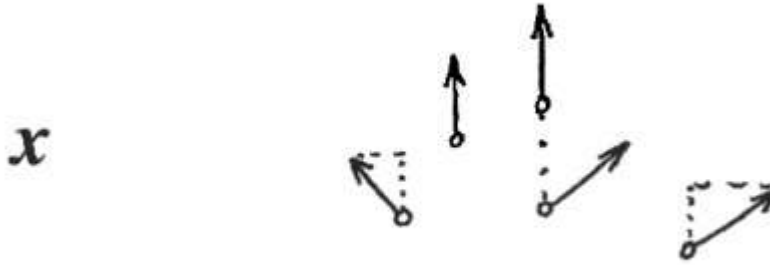


Figura 21

En este caso lo único que cuenta en relación con el área recorrida, o la conservación del momento angular, es la componente vertical del movimiento. Lo que descubrimos entonces es que la suma de los productos de las masas por sus velocidades verticales debe ser constante, porque el momento angular es constante respecto a cualquier punto, y si el punto elegido se halla muy lejos sólo son relevantes las masas y las velocidades. De esta manera, la conservación del momento angular implica la conservación del impulso. Esto a su vez implica la conservación de otra cosa que está tan íntimamente ligada a todo esto que ni siquiera me preocupé de ponerla en el cuadro. Se trata de un principio sobre el centro de gravedad (figura 22). Una masa dentro de una caja no puede desaparecer de una posición y aparecer en otra por las buenas. Esto no tiene nada que ver con la conservación de la masa: continuamos

teniendo la misma masa, aunque cambie de posición. La carga sí podía hacer algo así, pero no la masa.

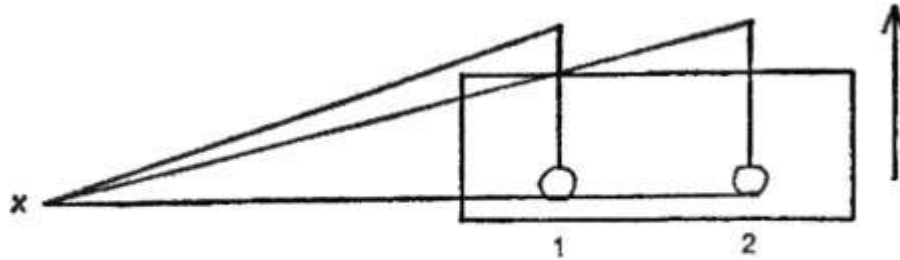


Figura 22

Veamos por qué. Las leyes de la física no se ven alteradas por el movimiento, por lo que podemos suponer que la caja está ascendiendo lentamente por los aires. Tomamos a continuación el momento angular desde un punto x no muy alejado. A medida que la caja va subiendo, si la masa interior se mantiene en su sitio, en la posición 1, irá generando un área a un ritmo determinado. Una vez que la masa se encuentra en la posición 2, el área aumentará a un ritmo mayor, porque la distancia de x a la masa habrá aumentado. Por el principio de conservación del momento angular no podemos variar la tasa de cambio del área. En consecuencia, una masa no puede desplazarse de un lugar a otro a menos que se impulse sobre otra cosa para compensar la diferencia de momento angular. Ésta es la razón por la cual los cohetes no pueden volar en el espacio vacío... y sin embargo vuelan. Si imaginamos que hay numerosas masas en juego, para que algunas de ellas se muevan hacia adelante otras tienen que moverse hacia atrás, de manera que el movimiento total de las masas hacia adelante y hacia atrás se quede

en nada. Así es como funciona un cohete. Al principio está quieto en el espacio, hasta que expelle gases por detrás y el cohete avanza. Lo que hay que recordar es que, teniendo en cuenta toda la materia del mundo, el centro de masas, la media de todas las masas, continúa estando donde estaba al principio. La parte que nos interesa ha avanzado, y la que no ha ido hacia atrás. Pero no existe teorema alguno que nos diga que las cosas interesantes del mundo se conservan; sólo se conserva la totalidad.

Descubrir las leyes de la física es como intentar construir un rompecabezas. Tenemos una cantidad ingente de piezas que además están proliferando rápidamente en la actualidad. Algunas no encajan de ninguna manera, y la pregunta es cómo sabemos que pertenecen al mismo juego, cómo sabemos que realmente son parte de un cuadro todavía incompleto. La verdad es que no lo sabemos, y esto nos preocupa en cierta medida, aunque nos anima descubrir características comunes en piezas distintas. Todas muestran un pedazo de cielo azul, o están fabricadas con la misma madera. Todas las diversas leyes físicas obedecen a los mismos principios de conservación.

Capítulo 4

Simetría y ley física

Al hombre le fascina la simetría. Nos gusta ver simetrías en la naturaleza. Nos fijamos, por ejemplo, en las esferas simétricas de los planetas y el Sol, o en los cristales simétricos de los copos de nieve, o en la simetría de las flores. Sin embargo, de lo que quiero hablar no es de la simetría de los objetos naturales, sino de la simetría de las propias leyes de la física. Es fácil entender la simetría de un objeto, pero ¿qué significa que una ley física posea simetría? Por supuesto, en sentido estricto no la posee, pero los físicos disfrutaban utilizando términos del lenguaje común para denotar cosas distintas. En el caso presente, puesto que las leyes de la física nos producen una impresión similar a la que produce la simetría de los objetos, hablamos de simetría de las leyes. De esto es de lo que voy a hablar.

¿Qué es la simetría? Si ustedes me miran me verán simétrico, al menos por fuera. Un jarrón puede ser simétrico de la misma u otra manera. ¿Cómo podemos definir la simetría? El hecho de que yo sea simétrico de derecha a izquierda significa que, si colocamos todo lo de un lado en el otro y viceversa (es decir, si intercambiamos ambos lados), tengo que continuar pareciendo exactamente la misma persona. Un cuadrado posee cierto tipo de simetría, porque si lo giramos 90 grados continúa pareciendo el mismo cuadrado. El profesor Weyl,¹² el matemático, dio una excelente definición de

¹² Hermann Weyl, 1885-1955, matemático alemán.

simetría según la cual una cosa es simétrica si se le puede hacer algo tal que, una vez hecho, la cosa se vea como antes. Éste es el sentido en el que decimos que las leyes de la física son simétricas: hay cosas que se les puede hacer a las leyes o a sus representaciones sin que nada cambie. Es de este aspecto de las leyes de la física de lo que va a tratar esta conferencia.

El ejemplo más simple de esta clase de simetría (y verán que seguramente no es lo mismo que habrían pensado ustedes, simetría de derecha a izquierda o algo de este estilo) es una simetría llamada de traslación en el espacio, que significa lo siguiente: si construimos cualquier aparato o efectuamos cualquier experimento y a continuación construimos el mismo aparato y llevamos a cabo el mismo experimento en una posición distinta del espacio, el resultado será el mismo en ambos sitios. En realidad, esto no se cumple en esta sala. Si construyo un aparato justo donde me encuentro ahora mismo y luego me traslado cinco metros a mi izquierda, me daré de narices contra la pared, lo cual introduce una complicación. Así pues, al definir esta idea es necesario tener en cuenta todo aquello que pueda influir en el resultado, de manera que se traslade el aparato junto con todo lo demás. Por ejemplo, si el sistema en cuestión incluye un péndulo y lo desplazo 50.000 km a mi derecha, la cosa no funcionará del todo bien porque el comportamiento del péndulo implica la atracción de la Tierra. Pero si imagino que a la vez que traslado el péndulo traslado la Tierra junto con él, entonces el resultado sí será el mismo. El problema en esta situación es que hay que trasladar todo aquello que pueda

tener una mínima influencia sobre el experimento. Esto suena un poco ridículo, porque parece una coartada perfecta para, en caso de que no se verifique la simetría por traslación, achacarlo a que no hemos trasladado todo lo que debíamos. En realidad, no es obvio que esta clase de simetría se verifique siempre. Lo verdaderamente curioso de la naturaleza es que es posible trasladar suficientes cosas para que todo funcione de la misma manera. Se trata, por lo tanto, de un enunciado positivo.

Quiero dar ejemplos de que esto es efectivamente cierto. Consideremos el caso de la ley de la gravedad, que afirma que la fuerza entre dos objetos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos; y quiero recordarles que un objeto responde a una fuerza cambiando de velocidad en la dirección de la fuerza. Si tengo un par de objetos, como un planeta girando alrededor de un sol, y los traslado, la distancia entre ellos no cambia y, por lo tanto, tampoco cambian las fuerzas. Además, en la nueva situación poseerán la misma velocidad y girarán de la misma manera. El hecho de que la ley hable de «distancia entre dos objetos», y no de alguna distancia absoluta desde el ojo central del universo, implica que las leyes son trasladables en el espacio.

Hasta aquí la primera simetría. La siguiente podría llamarse simetría de traslación en el tiempo, pero es mejor decir que las diferencias de tiempo no tienen efecto alguno. Pongamos a girar un planeta alrededor de un sol en cierto sentido; si pudiéramos empezar de nuevo dos horas más tarde, o dos años, con el planeta y el sol moviéndose de la misma manera, el sistema se comportaría

exactamente igual porque, una vez más, la ley de la gravedad se refiere a la velocidad y no al tiempo absoluto en el que se supone que hay que empezar a medir las cosas. De hecho, en este ejemplo concreto no estamos del todo seguros de que exista simetría. Al discutir la gravitación mencionamos la posibilidad de que la fuerza de gravedad cambiase con el tiempo. Esto significaría que no habría simetría de traslación temporal, porque si la constante gravitatoria dentro de mil millones de años es menor que ahora, no es cierto que el movimiento de nuestro sol y nuestro planeta imaginarios sea el mismo ahora que entonces. Así pues, hay que precisar que, hasta donde sabemos (sólo he discutido las leyes físicas tal como las conocemos hoy en día; ¡ojalá pudiera analizar las leyes de la física tal como las conoceremos en el futuro!), un salto en el tiempo no tiene efecto alguno.

Ahora bien, sabemos que en cierto sentido esto no es realmente así. Vale para lo que llamamos leyes físicas, pero una de las realidades del mundo (que es algo muy distinto) es que el universo parece haber tenido un comienzo perfectamente definido, y que está en proceso de expansión. De esto podríamos decir que es una condición geográfica, análoga al hecho de que cuando efectúo una traslación en el espacio tengo que trasladarlo todo. De la misma manera, podría decirse que las leyes no varían al transcurrir el tiempo y que debemos trasladar la expansión del universo junto con todo lo demás. Según esto, podríamos haber efectuado otro análisis en el que el universo habría empezado algo más tarde; sin embargo, no podemos trasladar el comienzo del universo, ni tenemos control

sobre ello, ni manera de definir la idea experimentalmente. De manera que no hay forma científica de saberlo. El hecho es que parece como si las condiciones del mundo fueran cambiando, que las galaxias fueran separándose de forma que, si en algún relato de ciencia ficción nos despertáramos en un momento desconocido del tiempo, mediante la medición de la distancia media entre galaxias podríamos averiguar en qué época estábamos. Esto significa que el mundo no permanece idéntico a medida que transcurre el tiempo.

Por convención, hoy se separan las leyes físicas, que nos indican cómo se mueven las cosas cuando sus condiciones iniciales están determinadas, de cualquier afirmación relativa al auténtico comienzo del mundo, porque sabemos muy poco sobre el particular. Se considera que la historia astronómica o cosmológica es un tema distinto del de las leyes físicas. Sin embargo, si se me exigiera precisar en qué consiste la diferencia me vería en apuros. La mejor característica de las leyes físicas es su universalidad, y si hay algo universal es la expansión del universo. Así pues, no sé definir la diferencia. Sin embargo, si me limito a las leyes de la física tal como las conocemos en la actualidad y me olvido del origen del universo, entonces un salto en el tiempo no tiene ningún efecto.

Veamos algunos otros ejemplos de simetría. Una implica la rotación en el espacio, una rotación fija. Si llevo a cabo una serie de experimentos con un equipo construido en cierto lugar y a continuación construyo otro exactamente igual (preferiblemente en otro lugar para evitar encontronazos), pero rotado de manera que sus ejes estén en una dirección distinta, todo funcionará igual. Una

vez más, deberemos girar todo aquello que sea relevante. Si se trata de un reloj de péndulo y lo ponemos horizontal, el péndulo quedará acostado sobre la caja y dejará de funcionar. Pero si al mismo tiempo giramos la Tierra (cosa que ocurre constantemente) el reloj continuará funcionando.

La descripción matemática de esta posibilidad de rotación es bastante interesante. Para describir lo que ocurre en una situación dada nos valemos de números para situar cada cosa en su sitio. Estos números se denominan coordenadas, y para situar un punto se suelen utilizar tres: uno para la altura del punto sobre un plano, otro para su posición adelante o atrás (positivo o negativo) y otro para su posición a derecha o izquierda. Para las rotaciones podemos prescindir de la coordenada vertical, de manera que uno puede localizar cualquier cuerpo diciendo a qué distancia se encuentra al frente y a la izquierda. Quienes hayan estado en Nueva York recordarán que las calles se numeran de esta manera (o así era hasta que cambiaron el nombre de la sexta avenida). La noción matemática de rotación es ésta: si localizo un punto dando sus coordenadas i e j , y otra persona localiza el mismo punto desde otra perspectiva mediante las coordenadas x' e y' relativas a su propia posición, puede verse entonces que mi coordenada x es una combinación de las dos coordenadas calculadas por el otro individuo. La relación consiste en que x es una combinación de x' e y' , mientras que y es una combinación de y' y x' . Las leyes de la naturaleza deben enunciarse de tal manera que, si se sustituyen x e y en las ecuaciones por estas combinaciones, su forma no se altera.

Así es como aparece la simetría rotacional en forma matemática. Existe una manera de cambiar x e y en las ecuaciones por x' e y' , que a su vez es una fórmula en términos de las viejas x e y , sin que las ecuaciones varíen excepto por las primas añadidas.

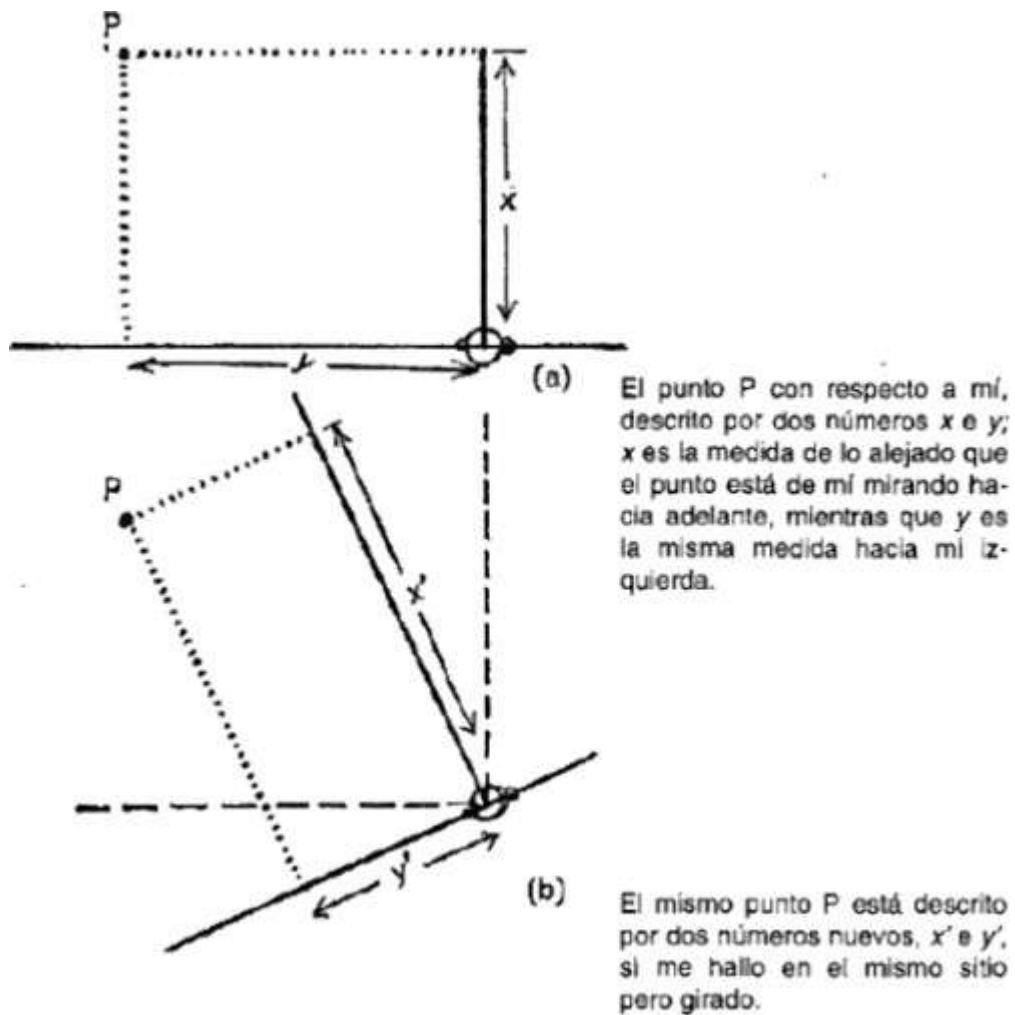


Figura 23

Esto significa que la otra persona verá en su aparato lo mismo que veo yo en el mío, que está girado en relación al otro.

Veamos otro ejemplo muy interesante de simetría. Esta vez implica velocidades uniformes y rectilíneas. Se supone que las leyes de la física se mantienen inalteradas a velocidad uniforme y rectilínea. Éste es el principio de relatividad. Si tenemos una nave espacial que contiene un instrumental con el que se realizan experimentos y tenemos un equipo semejante aquí en la Tierra, y si la nave se desplaza a velocidad uniforme, un observador en la nave no apreciará en su aparato efectos distintos de los que observo yo en el mío.

Claro que si se asoma por la ventana, o si la nave choca contra un muro exterior, o algo por el estilo, entonces las cosas cambian. Pero en la medida en que el observador se desplace a velocidad uniforme y rectilínea, las leyes de la física serán en apariencia las mismas tanto para él como para mí, y por lo tanto no puedo decir cuál de los dos se está moviendo.

Antes de proseguir, quiero subrayar que en todas estas transformaciones y en todas estas simetrías no estamos hablando de desplazar el universo entero. En el caso del tiempo no estaré diciendo nada si imagino que puedo trasladar todo el universo en el tiempo. Igualmente vacía será la afirmación de que si tomo el universo entero y lo traslado en el espacio, todo se comportará de la misma manera. Lo interesante es que si agarro un aparato y lo cambio de sitio, entonces, teniendo en cuenta una serie de condiciones, puedo trasladar un pedazo del mundo en relación a la media del resto de estrellas sin que se note diferencia alguna. En el caso de la relatividad esto significa que un individuo avanzando a

velocidad uniforme y rectilínea en relación a la media del resto de galaxias no apreciará efecto alguno de este movimiento. Dicho de otra manera, es imposible determinar experimentalmente desde el interior de un coche, sin mirar hacia el exterior, si uno se está moviendo en relación a las estrellas.

Esta proposición fue establecida en primer lugar por Newton. Tomemos su ley de la gravedad. Esta establece que las fuerzas son inversas a los cuadrados de las distancias, y que una fuerza produce un cambio de velocidad. Supongamos ahora que sé lo que ocurre cuando un planeta gira alrededor de un sol fijo, y que quiero investigar lo que ocurre cuando un planeta gira alrededor de un sol que viaja a la deriva. Resulta que todas las velocidades que tenía en el primer caso ahora son distintas: tengo que añadir una velocidad constante. Pero la ley la hemos establecido en términos de *cambios* en la velocidad, con lo cual la fuerza entre el planeta y el sol fijo es la misma que entre el planeta y el sol en movimiento, de manera que los cambios en las velocidades de los dos planetas serán los mismos. En consecuencia, sea cual fuere la velocidad adicional del segundo planeta, ésta se mantiene, y sólo habrá que añadir todos los cambios que ocurran. En términos matemáticos, el resultado neto es que, aunque se añada una velocidad constante, las leyes continuarán siendo las mismas, por lo que al estudiar el sistema solar y la manera de girar de los planetas no podemos saber si el Sol se está desplazando a su vez en el espacio.

Según la ley de Newton, un desplazamiento de este tipo no tendrá ningún efecto sobre el movimiento de los planetas alrededor del Sol,

por lo que Newton añadió: «El movimiento de unos cuerpos con respecto a otros en el espacio es el mismo tanto si este espacio está en reposo en relación a las estrellas fijas como si se mueve a velocidad uniforme según una línea recta».

A medida que fue pasando el tiempo se fueron descubriendo nuevas leyes, entre ellas las leyes de la electricidad de Maxwell.¹³ Una de las consecuencias de estas leyes es la existencia de ondas electromagnéticas (la luz es un ejemplo) que deben desplazarse *exactamente* a 300.000 km por segundo (en números redondos) pase lo que pase. Parecía fácil, por lo tanto, decidir si se estaba en reposo o no, porque la ley de que la luz tiene una velocidad fija de 300.000 km por segundo no permitía (a primera vista) que uno se desplazara sin notar algún efecto. Es evidente que si ustedes se hallan en una nave espacial que se aleja de mi posición de reposo a 200.000 km por segundo y disparo un rayo de luz a 300.000 km por segundo a través de un agujero de la nave, entonces la luz atravesará el interior de la nave a una velocidad de 100.000 km por segundo, ¿o no? Pues bien, si realizamos este experimento, ¡resulta que tanto a ustedes como a mí nos parece que la luz se mueve a 300.000 km por segundo!

Los fenómenos de la naturaleza no son fáciles de entender, y el resultado del experimento es tan contrario al sentido común que hay gente que todavía no se lo cree. Pero una y otra vez los experimentos realizados indican que la velocidad de la luz es de 300.000 km por segundo sea cual sea la velocidad del observador.

¹³ James Clerk Maxwell, 1831-1879. Primer profesor de física experimental en Cambridge.

¿Cómo puede ser esto? Einstein advirtió, lo mismo que Poincaré¹⁴, que la única forma de explicar que la velocidad de la luz sea la misma para una persona en reposo que para otra en movimiento es que su sentido del tiempo y del espacio difieran. Los relojes del interior de la nave espacial deben marchar más despacio que los relojes de la Tierra. Alguien dirá: «Ah, pero si el reloj de la nave va más lento me daré cuenta de ello». Pues no, ¡porque su cerebro también irá más lento! De esta manera se consiguió construir un sistema tal que en el interior de la nave la velocidad de la luz sería de 300.000 km (de nave) por segundo (de nave), mientras que aquí abajo la velocidad sería de 300.000 km (de los míos) por segundo (de los míos). Hace falta mucho ingenio para idear algo así y, sorprendentemente, resulta que es posible y además funciona.

Ya he mencionado que una de las consecuencias de este principio de la relatividad es la imposibilidad de conocer la velocidad a la que nos movemos en línea recta. En la anterior conferencia vimos el caso de dos coches, A y B, uno en reposo y otro en movimiento (figura 24).

Ocurría un suceso en cada extremo del coche B. Una persona se hallaba en el centro del coche y los sucesos x e y ocurrían en cada extremo del coche en sendos instantes, que él consideraba el mismo porque, al estar en el centro, la luz procedente de ambos extremos le llegaba al mismo tiempo. Pero una persona en el coche A, que se estaba moviendo a una velocidad constante con respecto a B, observaba ambos sucesos en momentos sucesivos: primero veía x ,

¹⁴ Jules Henri Poincaré, 1854-1912, científico francés.

puesto que al avanzar hacia ese extremo le llegaba antes su luz que la procedente de y .

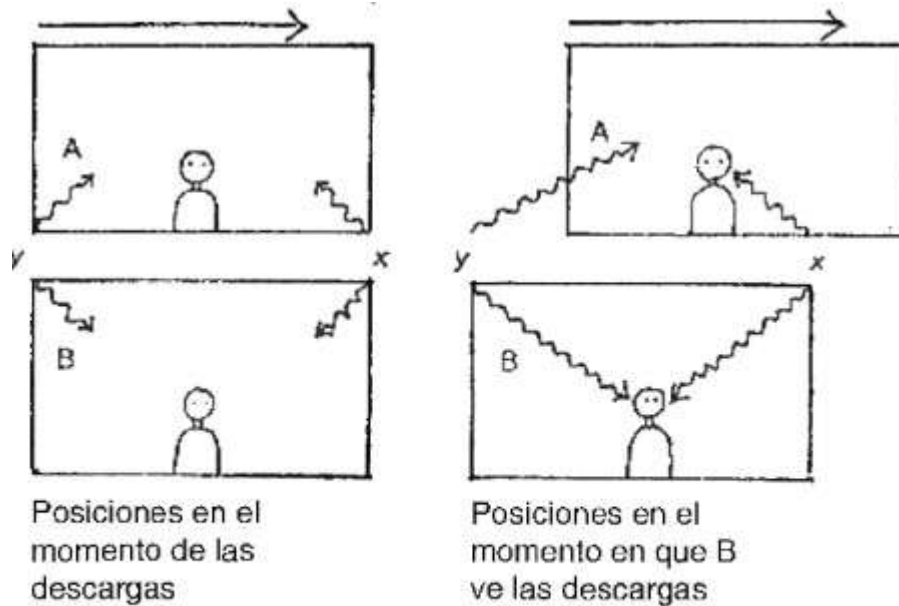


Figura 24

Con ello constatamos que una de las consecuencias del principio de simetría en el caso de velocidad uniforme y rectilínea (el término simetría en este contexto significa que no es posible decidir cuál es el punto de vista correcto) es que cuando hablo de todas las cosas que están sucediendo en el mundo «ahora» estoy diciendo algo que carece de sentido. Si ustedes se están moviendo a velocidad uniforme en línea recta, los acontecimientos que a ustedes les parecen simultáneos no son los mismos acontecimientos que a mí me parecen simultáneos, incluso si nos cruzamos precisamente en el instante en que a mí me parece que tienen lugar acontecimientos simultáneos. Es imposible que nos pongamos de acuerdo sobre lo

que, lejos de nosotros, significa «ahora». Mantener el principio de que es imposible percibir una velocidad uniforme y rectilínea representa una profunda transformación de nuestras ideas de espacio y tiempo. En realidad, lo que está ocurriendo es que dos acontecimientos que desde cierto punto de vista parecen simultáneos, desde otro punto de vista no parecen serlo, siempre que no ocurran en el mismo lugar, sino bastante alejados uno de otro.

Puede verse que esto es muy parecido a la cuestión de x e y en el espacio. Si me encuentro delante de un auditorio, para mí las paredes de ambos lados tienen la misma x pero diferente y . Pero si doy un giro de 90° y considero el mismo par de paredes desde mi nuevo punto de vista, resulta que una está delante mío y la otra detrás; ahora tienen una x' diferente. De forma análoga, dos sucesos que desde un punto de vista parecen ocurrir en el mismo instante t , desde otro punto de vista parecen ocurrir en dos instantes t' distintos. Se hace necesario, por lo tanto, generalizar la rotación bidimensional de la que hemos hablado añadiendo el tiempo al espacio para dar lugar a un mundo de cuatro dimensiones. No se trata de un añadido artificial, como sugieren las explicaciones que ofrece la mayoría de libros de divulgación, según las cuales «se añade el tiempo al espacio porque no basta con localizar un punto en el espacio, hay que situarlo también en el tiempo». Esto es cierto, pero no da lugar a un espacio-tiempo real de cuatro dimensiones; simplemente yuxtapone dos cosas distintas. El espacio real se caracteriza porque su existencia es independiente del

punto de vista particular, de manera que, si se observa desde puntos de vista diferentes, cierta cantidad de «delante-detrás» puede mezclarse con algo de «izquierda-derecha». De manera análoga, cierta cantidad de tiempo «futuro-pasado» puede mezclarse con un poco de espacio. Espacio y tiempo deben estar completamente imbricados; después de este descubrimiento, Minkowski dijo que «el espacio como tal y el tiempo como tal se convertirán en meras sombras, y solamente sobrevivirá una unión entre ellos».

Me he explayado en este ejemplo concreto porque con él se inició el estudio de las simetrías en las leyes físicas. Fue una sugerencia de Poincaré la de analizar lo que puede hacerse con las ecuaciones. Fue Poincaré quien se fijó en las simetrías de las leyes físicas. Las simetrías de traslación en el espacio o de dilación en el tiempo, por ejemplo, no son muy profundas, pero la simetría de movimiento rectilíneo y uniforme es muy interesante y tiene numerosas consecuencias. Además, estas consecuencias pueden extenderse a leyes que no conocemos. Por ejemplo, basándonos en el supuesto de que este principio se cumple en la desintegración de un mesón mu, podemos afirmar que tampoco es posible utilizar mesones mu para determinar la velocidad a la que vamos en una nave espacial; en consecuencia, el principio de simetría nos dice algo sobre la desintegración del mesón mu, aunque, para empezar, ni siquiera sepamos por qué se desintegra.

Hay muchas otras simetrías, algunas de naturaleza muy distinta. Mencionaré sólo unas cuantas. Una afirma que puede sustituirse un átomo por otro de la misma clase sin que se note la diferencia en

ningún fenómeno. Claro que alguien preguntará: «¿Qué quiere decir de la misma clase?». Mi respuesta sólo puede ser: ¡uno que puede ser sustituido por el otro sin que se note la diferencia! ¿No parece que los físicos estén siempre diciendo tonterías? Hay muchas clases de átomos. Si sustituimos uno por otro de una clase distinta, la diferencia se hace notar; pero no si se sustituye por otro de la misma clase, con lo cual parece que entramos en un círculo vicioso. Pero el verdadero significado de lo que decimos es que *existen* átomos de la misma clase; que *es posible* definir clases de átomos de manera que dentro de una misma clase se puedan sustituir unos por otros sin que se aprecie diferencia alguna. Puesto que el número de átomos en cualquier trozo minúsculo de materia es del orden de 1 seguido de 23 ceros, es muy importante que no todos sean distintos. Resulta, por lo tanto, muy interesante poder clasificarlos en unos pocos centenares de tipos atómicos distintos, con lo que la afirmación de que podemos sustituir un átomo por otro de la misma clase tiene mucho contenido. En realidad, tiene el mayor contenido que puede tener en mecánica cuántica, aunque no puedo explicarles por qué, en parte (pero sólo en parte) porque esta conferencia está dirigida a un público no matemático; en cualquier caso, ésta es una cuestión muy sutil. En mecánica cuántica, la proposición de que un átomo puede sustituirse por otro de la misma clase tiene consecuencias maravillosas. Subyace tras el peculiar fenómeno de la superfluidez del helio líquido, que fluye por los conductos sin oponer resistencia alguna. Más aún, es el origen de toda la tabla periódica de los elementos y de la fuerza que me impide escurrirme

a través del suelo. No puedo dar más detalles, pero quiero subrayar la importancia de estos principios.

Seguramente a estas alturas ya estarán ustedes convencidos de que las leyes físicas son simétricas para cualquier tipo de cambio imaginable, de manera que me siento obligado a mencionar algunas excepciones. La primera es el cambio de escala. No es cierto que si construimos un aparato a una escala y otro exactamente igual, con los mismos materiales, pero el doble de grande, ambos funcionarán exactamente de la misma manera. Aquellos de ustedes que estén familiarizados con los átomos entenderán lo que digo, porque si hiciéramos un aparato diez mil millones de veces más pequeño, sólo contendría cinco átomos, y no es posible construir ninguna máquina con sólo cinco átomos. Es absolutamente obvio que no es posible reducir la escala hasta tal extremo. Sin embargo, incluso antes de que se tuviera una idea precisa del mundo atómico, ya se constató que las leyes físicas no eran invariantes ante un cambio de escala. Quizás alguna vez hayan leído en los periódicos que alguien ha construido una catedral con cerillas (una catedral de varios pisos, más gótica y más ornada que cualquier catedral gótica). ¿Por qué no se han construido jamás catedrales así de tamaño natural, con grandes vigas, con la misma profusión de adornos y detalles? La respuesta es que la catedral sería tan alta y tan pesada que se hundiría. ¡Ah!, pero estamos olvidando que al comparar dos cosas hay que transformar el sistema entero. La pequeña catedral hecha de cerillas sufre la atracción de la Tierra, de manera que, para poder compararla con la gran catedral, ésta debería ser atraída por una

tierra mucho más grande. ¡Fatal! Una tierra mayor ejercería una atracción aún mayor sobre la catedral, que se hundiría incluso antes.

Fue Galileo quien, al considerar la solidez de los huesos, advirtió por primera vez la no invariancia de las leyes de la física ante un cambio de escala. Por ejemplo, un animal el doble de alto, ancho y grueso tendrá que sostener un peso ocho veces mayor de lo normal, por lo que necesitará unos huesos ocho veces más resistentes. Pero la resistencia de un hueso depende del área de su sección transversal. Si un hueso se hace el doble de ancho, su sección transversal aumenta sólo cuatro veces, por lo que sólo podrá soportar un peso cuatro veces mayor. En su *Diálogo sobre dos nuevas ciencias* pueden verse dibujos de huesos imaginarios de perros enormes y desproporcionados. Me imagino que Galileo creyó que su descubrimiento de que las leyes de la naturaleza no eran invariantes ante un cambio de escala era tan importante como el de sus leyes del movimiento, porque ambos aparecen juntos en su libro.

Otro ejemplo de no simetría es el movimiento giratorio. Si estamos rotando en una nave espacial a velocidad angular uniforme, no es cierto que no podamos saber que giramos. Podría decir que sentiríamos que la cabeza nos daba vueltas, pero habría otros efectos: los objetos del interior de la nave serían lanzados contra las paredes por la fuerza centrífuga (o como se llame; ¡espero que entre el público no haya ningún profesor de primer año de física para corregirme!). Se puede constatar que la Tierra gira mediante un

péndulo o un giroscopio, y en muchos museos y observatorios hay péndulos de Foucault¹⁵ para demostrar la rotación de la Tierra sin necesidad de mirar las estrellas. Es posible constatar que estamos rotando a una velocidad angular uniforme sin mirar afuera, porque las leyes de la física no son invariantes con respecto a este tipo de movimiento.

Muchos han afirmado que, en realidad, la Tierra está girando en relación a las galaxias, y que si hiciéramos girar también las galaxias no notaríamos diferencia alguna. Bueno, no sé qué pasaría si hiciéramos girar el universo entero, y en la actualidad no hay forma de saberlo. Tampoco tenemos una teoría que describa la influencia de una galaxia sobre las cosas de la Tierra, por lo que se asume llanamente que la inercia rotacional, el efecto de la rotación, el hecho de que la superficie de un cubo de agua que gira adquiera forma cóncava, es el resultado de una fuerza que proviene de los objetos en derredor. No se sabe si esto es así. La idea se conoce como principio de Mach, pero su validez no ha sido demostrada. La cuestión experimental más directa es si la rotación a velocidad uniforme con respecto a las galaxias tiene algún efecto apreciable. La respuesta es afirmativa. En cambio, si nos movemos en una nave espacial a velocidad uniforme y en línea recta con respecto a las galaxias, no notamos ningún efecto. Son dos cosas distintas. Así pues, no podemos decir que todo movimiento es relativo. Esto no es lo que dice la relatividad. La relatividad establece que el movimiento uniforme y rectilíneo respecto de las galaxias no es detectable.

¹⁵ Jean Bemard Léon Foucault, 1819-1868. Físico francés.

La simetría que me gustaría discutir a continuación no sólo es interesante por sí misma, sino por su historia. Se trata de la reflexión en el espacio. Supongamos que construyo un aparato, digamos un reloj de pared, y a cierta distancia del primero construyo otro reloj de pared que sea la imagen especular del primero. Son como dos guantes: uno derecho y otro izquierdo. Si a un reloj se le da cuerda en un sentido, al otro se le dará en el otro, y así sucesivamente. Acto seguido doy cuerda a ambos relojes y los dejo en marcha en sus lugares respectivos. La cuestión es: ¿marcarán siempre la misma hora ambos relojes? ¿Funcionará siempre una maquinaria como la imagen especular de la otra? No sé qué estarán pensando ustedes. Probablemente contestarán que sí; ésta fue la respuesta mayoritaria en primera instancia. No hace falta decir que no estamos hablando de geografía. En geografía podemos distinguir entre derecha e izquierda. Podemos decir que si estamos en Florida y miramos hacia Nueva York, el mar queda a nuestra derecha. Esto permite distinguir la derecha de la izquierda, pues el segundo reloj no funcionaría bajo el agua. En este caso tendríamos que imaginar que también se invierte la geografía de la Tierra; todo debería transformarse en su imagen especular. Dejemos la geografía y vayamos a la historia. Si se coge al azar un tornillo en una ferretería lo más probable es que se atornille hacia la derecha; podríamos decir que sería imposible construir un reloj que fuera la imagen especular de otro porque es difícil encontrar tornillos con rosca siniestra. Pero esto es sólo cuestión del tipo de tornillos que se fabrican. Así pues, a primera vista, parece que la reflexión no

introduce diferencia alguna. Esto vale para las leyes de la gravedad, la electricidad y el magnetismo. Si los relojes tuvieran entrañas eléctricas y magnéticas, cables, conexiones, corrientes y lo que se quiera, ambos relojes funcionarían igual. Tampoco se notaría diferencia alguna si los relojes necesitaran para su funcionamiento de reacciones nucleares ordinarias. Pero hay algo que sí puede dar lugar a diferencias.

Quizá sepan ustedes que es posible conocer la concentración de azúcar en el agua haciendo pasar luz polarizada a través del líquido. Si se coloca un filtro polarizador que solamente deje pasar luz a través de cierto eje, se constata que, para hacer que la luz atraviese el líquido, debe colocarse en el lado opuesto otro filtro polarizador girado hacia la *derecha*, tanto más cuanto mayor sea la cantidad de azúcar en el agua. Si hacemos pasar la luz en sentido opuesto continúa siendo necesario girar el filtro hacia la derecha. Aquí tenemos una diferencia entre derecha e izquierda. Supongamos que nuestros relojes incorporan un depósito con agua azucarada sobre el que incide un rayo de luz y giramos nuestro segundo filtro de manera que permitimos que la luz salga por el otro lado; ahora supongamos que hacemos lo mismo con el segundo reloj, esperando que la luz girará a la izquierda. Vana esperanza: la luz continuará girando hacia la derecha y, por lo tanto, no saldrá por el otro lado. ¡El agua azucarada puede hacer que nuestros dos relojes se comporten de manera diferente!

Se trata de un hecho de lo más notable, y a primera vista parece indicar que las leyes físicas no son simétricas por reflexión.

Seguramente el azúcar que hemos usado antes era de remolacha. Pero la molécula de azúcar es relativamente simple, por lo que no es imposible obtener azúcar en el laboratorio a partir de anhídrido carbónico y agua, a través de numerosos pasos intermedios. Si intentamos el mismo experimento con azúcar artificial, que desde el punto de vista químico parece ser idéntico al anterior, resulta que no hace girar la luz. Si colocamos bacterias que comen azúcar en el agua con azúcar artificial y después de un tiempo observamos lo ocurrido, resulta que las bacterias sólo se habrán comido la mitad del azúcar. Si, una vez las bacterias han terminado de comer, hacemos pasar luz polarizada a través del agua azucarada restante, se constata que la luz gira hacia la *izquierda*. La explicación de este fenómeno es la siguiente. La molécula de azúcar tiene una estructura compleja. Si reproducimos exactamente la misma estructura, pero cambiando derecha por izquierda, se mantienen las distancias entre pares de átomos, así como la energía de la molécula y, en lo que respecta a cualquier fenómeno químico que no guarde relación con la vida, la molécula nueva es exactamente igual que la anterior. Pero los seres vivos reconocen la diferencia. Las bacterias comen un tipo de azúcar pero no el otro. El azúcar procedente de la remolacha es siempre de una misma clase, con moléculas que hacen girar la luz a la derecha. Este es el tipo de moléculas que asimilan las bacterias. Cuando sintetizamos azúcar a partir de sustancias no asimétricas, gases simples, obtenemos moléculas de ambos tipos en cantidades iguales. Si luego introducimos bacterias en el azúcar, éstas comerán un tipo y dejarán el otro. Por esto,

cuando la luz atraviesa la solución, gira en sentido distinto, a la izquierda. Es posible distinguir los dos tipos de moléculas mirando los cristales con una buena lupa, tal como descubrió Pasteur¹⁶. Nada de todo esto nos plantea dificultad alguna, y nosotros mismos podemos separar fácilmente ambos tipos de azúcar sin necesidad de acudir a las bacterias. Pero lo verdaderamente interesante es que las bacterias *puedan* hacerlo. ¿Significa esto que los procesos vivos no obedecen las mismas leyes que los otros? Parece que no. En los seres vivos hay muchísimas moléculas complicadas, todas las cuales parecen ser de un mismo tipo. Algunas de las moléculas más características de los seres vivos son proteínas. Éstas poseen una propiedad de sacacorchos, es decir, giran hacia la derecha. Por lo visto, si pudiéramos sintetizar las mismas sustancias químicamente, pero con giro siniestro en vez de diestro, éstas no podrían funcionar porque no encajarían con las proteínas biológicas. Las proteínas con giro siniestro encajarían con otras que también giraran a la izquierda, pero no es posible articular derecha e izquierda. Las bacterias, cuyas entrañas químicas tienen giro diestro, son capaces de distinguir entre un azúcar con giro diestro y uno con giro siniestro.

¿Cómo llegaron a conseguirlo? Ni la física ni la química pueden diferenciar entre estas moléculas, y sólo pueden construir ambas al mismo tiempo. Pero la biología sí puede. No es difícil creer en la explicación de que hace mucho tiempo, cuando se iniciaron los procesos vitales, accidentalmente se constituyó una molécula de un

¹⁶ Louis Pasteur. 1822-1895. Bacteriólogo francés.

tipo determinado que empezó a propagarse por reproducción hasta que, muchos años más tarde, esas curiosas estructuras con sus enganches complementarios van juntas del brazo... Nosotros somos los descendientes de aquellas primeras moléculas, y fue un accidente que se formaran en un sentido y no en el otro. Tenía que ser uno u otro, derecha o izquierda, para luego reproducirse y continuar propagándose para siempre de la misma manera. Es algo parecido a los tornillos de la ferretería. Se utilizan tornillos con giro a la derecha para fabricar más tornillos con giro a la derecha. El hecho de que todas las moléculas de los seres vivos tengan exactamente el mismo tipo de giro es probablemente una de las demostraciones más profundas de la uniformidad de los orígenes de la vida, que nos remite al mismísimo nivel molecular.

Con el fin de verificar de manera más adecuada la cuestión de si las leyes de la física son las mismas a derecha e izquierda, podemos planteamos el problema de la siguiente manera. Supongamos que vamos a tener una conversación telefónica con un marciano y deseamos describirle cómo son ciertas cosas en la Tierra. Lo primero de todo es hacernos entender. Este tema ha sido intensivamente estudiado por el profesor Morrison¹⁷ de Cornell y, según él, una manera de empezar es diciendo «tic, uno; tic, tic, dos; tic, tic, tic, tres», etc. Muy pronto el marciano caería en la cuenta de que estábamos tratando de comunicarle los números. Una vez entendido nuestro sistema de numeración, podríamos escribir toda una sucesión de números que representaran los pesos

¹⁷ Philip Morrison, profesor estadounidense de física.

(proporcionales) de los diferentes átomos por orden, empezando por «hidrógeno, 1'008», luego deuterio, helio, y así sucesivamente. Nuestro marciano, tras estudiar estos números durante un tiempo, descubriría que las cifras telefoneadas correspondían a los pesos de los elementos químicos y que, en consecuencia, los nombres deberían corresponder a los nombres de dichos elementos. De esta manera podría construirse gradualmente un lenguaje común. Pero ahora surge un problema. Supongamos que, una vez entablada la amistad, nos dice: «Pues la verdad es que sois muy simpáticos; ahora me gustaría saber qué aspecto tenéis». A lo que contestamos: «Medimos alrededor de metro ochenta de altura», y él nos contesta: «¿Metro ochenta; y eso cuánto es?». La respuesta es muy fácil: «Metro ochenta es unos diecisiete mil millones de átomos de hidrógeno uno encima de otro». Que conste que esto no es un chiste, sino una de las maneras posibles de describir un metro ochenta a alguien que no tiene forma de medirlo, suponiendo que no podemos enviarle ninguna muestra ni podemos mirar al mismo tiempo un mismo objeto. No tendríamos ninguna dificultad para describir lo altos que somos. Esto es así porque las leyes de la física no son invariantes ante un cambio de escala, lo que nos permite fijar una escala. Podemos continuar describiéndonos (vistos de frente tenemos cierta bilateralidad, somos así y asá, tenemos apéndices que nos salen del cuerpo, etc.). Luego él nos pregunta: «Muy interesante, pero ¿cómo sois por dentro?». A lo que nosotros contestamos describiendo el corazón y otros órganos, y le decimos que el corazón está situado en el lado izquierdo. Ahora bien, ¿cómo

vamos a indicarle qué lado es el izquierdo? «Fácil», dirán ustedes, «tomamos azúcar de remolacha, lo disolvemos en agua y...» El problema es que en Marte no hay remolachas. Tampoco tenemos forma de saber si los accidentes de la evolución en Marte, aun en el caso de que hubieran dado lugar a proteínas semejantes a las nuestras, hicieron que la vida empezara con proteínas de giro opuesto al de las nuestras. Tras mucho pensar, al final comprendemos que no sabemos cómo explicarle al marciano qué es el lado izquierdo y admitimos que es imposible hacerlo.

Hace unos cinco años, sin embargo, ciertos experimentos crearon toda clase de problemas. No voy a entrar en detalles, pero los físicos nos fuimos encontrando con dificultades cada vez mayores, con situaciones cada vez más paradójicas, hasta que finalmente Lee y Yang¹⁸ propusieron que el principio de simetría izquierda-derecha (es decir, el principio según el cual la naturaleza es la misma por la derecha que por la izquierda) no siempre se cumplía, lo cual podía explicar unos cuantos misterios. Lee y Yang propusieron algunos experimentos directos para demostrarlo; sólo mencionaré el más directo de ellos.

Tomemos el caso de una desintegración radiactiva en la que, por ejemplo, se emiten un electrón y un neutrino (un ejemplo del que ya hemos hablado es la desintegración de un neutrón en un protón, un electrón y un antineutrino, y hay muchas radiactividades en las que la carga del núcleo aumenta en una unidad y se emite un electrón). Lo interesante del caso es que si se mide el *spin* (los electrones giran

¹⁸ Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang, físicos chinos, premios Nobel en 1957.

al ser emitidos) descubrimos que giran hacia la izquierda (vistos desde atrás; es decir, si se dirigen hacia el sur, giran en el mismo sentido que la Tierra). El hecho de que un electrón emitido en un proceso de desintegración gire siempre en un sentido (hacia la izquierda) tiene un significado muy preciso. Es como si, en la desintegración beta, el fusil que dispara el electrón fuera de cañón estriado. Pero hay dos posibilidades: el cañón puede hacer girar el proyectil en sentido diestro o siniestro. El experimento demuestra que el electrón sale por un cañón estriado siempre en sentido siniestro. Sobre la base de este hecho, podríamos llamar a nuestro marciano y decirle: «Oye, toma material radiactivo, un neutrón, y fíjate en el electrón que se emite en una desintegración beta. Si el electrón sale disparado hacia arriba, su sentido de giro es de la espalda hacia dentro del cuerpo por el lado *izquierdo*. Esto define la izquierda, el lado donde está el corazón». En consecuencia, es posible distinguir la izquierda de la derecha, lo que invalida el principio de que el mundo es simétrico con respecto a la reflexión.

El siguiente tema que me gustaría discutir es la relación entre las leyes de conservación y las leyes de simetría. En la última conferencia hablé de los principios de conservación: de la energía, del impulso, del momento angular, etc. Es extremadamente interesante constatar que parece existir una profunda conexión entre las leyes de conservación y las leyes de simetría. Esta conexión tiene su interpretación correcta, al menos tal como lo entendemos hoy, en el marco de la mecánica cuántica. Pero voy a darles una demostración.

Si suponemos que las leyes de la física pueden describirse mediante un principio minimal, puede demostrarse que si una ley es tal que nada cambia si se traslada todo el equipo (en otras palabras, si la ley permite una traslación en el espacio) entonces debe regir la ley de conservación del impulso. Existe una conexión profunda entre los principios de simetría y las leyes de conservación, pero esta conexión exige asumir el principio del mínimo. En mi segunda conferencia discutimos una forma de describir las leyes de la física como si una partícula se desplazara de un punto a otro en cierto tiempo probando distintas trayectorias. Existe una cantidad que, quizá sin mucho acierto, se ha dado en llamar acción. Si calculamos la acción de las distintas trayectorias, se comprueba que el valor correspondiente al camino que efectivamente sigue la partícula es siempre menor que el de cualquier otra trayectoria. Esta manera de describir las leyes de la naturaleza equivale a decir que la acción de ciertas fórmulas matemáticas tiene el valor mínimo para el caso de la trayectoria real. Otra manera de indicar que algo es un mínimo consiste en decir que si se cambia un poco el camino, al principio no se nota ninguna diferencia. Supongamos que estamos paseando por unas colinas (suaves y lisas, puesto que los objetos matemáticos de que hablo tienen estas características) y llegamos al lugar más bajo del recorrido; lo que decía es que si en esta situación damos un paso hacia adelante, la altura no variará apreciablemente. Cuando nos hallamos en el punto más bajo o en el más alto, dar un paso más no cambia las cosas en una primera aproximación, mientras que si estamos en una pendiente se puede bajar o subir dando un

solo paso. Esta es la clave para entender que, en el punto más bajo, dar un paso más no nos hace subir, puesto que si fuera así bastaría con dar el paso en sentido opuesto para bajar aún más. Puesto que nos hallamos en el punto más bajo y no se puede bajar más, en una primera aproximación podemos considerar que un paso no tiene importancia. Así pues, sabemos que si cambiamos algo una de las trayectorias, en una primera aproximación esto no afecta a la acción. Dibujemos una trayectoria de A a B (figura 25). Ahora quiero que consideren la siguiente trayectoria también posible: primero saltamos a otro lugar cercano C, y luego nos trasladamos siguiendo una trayectoria idéntica a la anterior hasta el punto D, situado, obviamente, a una distancia igual. Por otro lado, acabamos de descubrir que las leyes de la naturaleza son tales que la cantidad total de acción para la trayectoria ACDB es, en primera aproximación, la misma que para la trayectoria original AB (siempre que ésta sea la trayectoria real, por el principio del mínimo). Ahora fíjense en que la acción sobre la trayectoria inicial, de A a B, es la misma que la acción de C a D si el mundo es invariante por traslación, porque la diferencia entre ambas trayectorias es sólo una traslación. De manera que, si el principio de simetría traslacional es cierto, la acción sobre la trayectoria directa de A a B es la misma que sobre la trayectoria directa de C a D. Ahora bien, para el movimiento real la acción total sobre la trayectoria indirecta ACDB es prácticamente la misma que sobre la trayectoria directa AB y, en



Figura 25

consecuencia, casi la misma que sobre la trayectoria CD. La acción indirecta es la suma de tres partes: la acción de A a C más la de C a D más la de D a B. Eliminando los términos iguales, es fácil ver que la suma de las contribuciones de A a C y de D a B debe ser nula. Pero en estos dos sectores vamos en un sentido y luego en el opuesto.

Si consideramos la contribución de AC como efecto de un movimiento en un sentido y la contribución de DB igual que la de BD, pero de signo opuesto, entonces el valor correspondiente a AC tiene que igualar el correspondiente a BD. Éste es el efecto sobre la acción de un pequeño desplazamiento de B a D. Esta cantidad, el efecto sobre la acción de un pequeño desplazamiento hacia la derecha, es la misma al principio (de A a C) que al final (de B a D). Existe, pues, una cantidad que no varía en el tiempo, siempre y cuando rija el principio del mínimo y se cumpla el principio de simetría traslacional. Esta cantidad invariante (el efecto sobre la acción de un pequeño desplazamiento lateral) es precisamente el impulso que discutimos en la conferencia anterior. Esto pone de manifiesto la relación existente entre las leyes de simetría y las leyes de conservación, suponiendo que estas leyes obedezcan un principio de mínima acción; y lo obedecen, en efecto, porque emanan de la mecánica cuántica. Por eso he dicho que, en última instancia, la conexión entre las leyes de simetría y las leyes de conservación reside en la mecánica cuántica.

Un argumento paralelo a propósito de las traslaciones en el tiempo nos daría como resultado la conservación de la energía. La simetría

rotacional conduce a la conservación del momento angular. La simetría por reflexión no es un asunto simple desde el punto de vista clásico. Se le ha dado en llamar paridad, y por eso existe una ley de conservación de la paridad, pero esto no son más que términos rebuscados. Tengo que mencionar la conservación de la paridad porque seguramente habrán leído en los periódicos que se ha demostrado que la ley de conservación de la paridad es falsa. Esto hubiese sido mucho más fácil de entender si se hubiera dicho que el principio falso era el de no poder distinguir entre izquierda y derecha.

Hablando de simetrías, quisiera decirles que han surgido unos cuantos problemas nuevos. Por ejemplo, para cada partícula existe una antipartícula: al electrón le corresponde el positrón, al protón el antiprotón... En principio, podemos incluso crear lo que se ha dado en llamar antimateria, hecha de las antipartículas de la materia. El átomo de hidrógeno es un protón y un electrón; si juntamos un antiprotón, que tiene carga negativa, y un positrón, también obtendremos una especie de átomo de hidrógeno, un átomo de antihidrógeno. En realidad, jamás se han creado átomos de antihidrógeno, pero se tiene la impresión de que, en principio, no hay problema alguno, y que de la misma manera podría crearse toda clase de átomos de antimateria. Conviene preguntarse a continuación si la antimateria se comporta igual que la materia. Pues bien, hasta donde sabemos, así parece. Un principio de simetría indica que cualquier cosa hecha de antimateria se comportaría igual que si estuviera hecha de materia. Por

descontado, si llegaran a ponerse en contacto se aniquilarían mutuamente entre chispas.

Siempre se ha creído que la materia y la antimateria obedecen las mismas leyes. Sin embargo, ahora que sabemos que la simetría izquierda-derecha parece ser falsa, se plantea una importante cuestión. Si observamos la desintegración de un neutrón, pero con antimateria (es decir, un antineutrón se transforma en un antiprotón más un antielectrón, también llamado positrón, más un neutrino), la pregunta que cabe hacerse es: ¿ocurre todo de la misma manera, en el sentido de que el positrón surgirá con una rotación siniestra, o pasará al revés? Hasta hace poco pensábamos que las antipartículas se movían al revés, y que cuando la materia (electrón) gira a la izquierda, la antimateria (positrón) gira a la derecha. Si esto fuera así no podríamos decirle al marciano dónde está la derecha y dónde la izquierda porque, si resulta estar hecho de antimateria, cuando lleve a cabo el experimento de antes sus electrones serán positrones que saldrán girando en sentido contrario y, por lo tanto, colocará el corazón en el lado contrario. Supongan que llamamos a nuestro marciano y le explicamos cómo fabricar un hombre; el marciano sigue nuestras instrucciones y fabrica un hombre que funciona. A continuación le explicamos todas nuestras convenciones sociales. Por último, después de que él nos explique cómo construir una nave espacial lo bastante buena, vamos al encuentro del hombre fabricado en Marte y al llegar frente a él extendemos nuestro brazo derecho con la intención de darle un apretón de manos. Si nos tiende también su mano derecha, todo

perfecto, pero si nos ofrece su mano izquierda, ¡peligro!... podemos destruirnos mutuamente.

Me gustaría hablarles de unas cuantas simetrías más, pero se hacen difíciles de explicar. Además, también hay algunas cosas muy notables que son cuasi-simetrías. Por ejemplo, lo verdaderamente notable de la distinción entre derecha e izquierda es que sólo puede hacerse mediante un efecto muy débil, la llamada desintegración beta. Lo que esto significa es que en el 99,99 por ciento de los casos la naturaleza no permite distinguir entre derecha e izquierda, y solamente existe una pequeña parcela, un minúsculo fenómeno, que se comporta de manera totalmente distinta, en el sentido de que se decanta absolutamente hacia un lado. Se trata de un misterio sobre el que nadie tiene todavía la más remota idea.

Capítulo 5

La distinción entre pasado y futuro

Resulta obvio para cualquiera que los fenómenos del mundo son irreversibles. Es decir, que las cosas ocurren en un sentido y no en el opuesto. Dejamos caer un vaso y se rompe, y ya podemos esperar sentados a que los pedazos del suelo vuelvan a juntarse y salten de nuevo hacia nuestra mano en forma de vaso. Si observamos las olas rompiendo contra un acantilado, ya podemos esperar que la espuma se concentre, forme una gran ola y se retire de la costa. ¡Sin duda sería hermosísimo!

La constatación de estos hechos suele hacerse pasando una película al revés y esperando la carcajada general. La carcajada significa que estas cosas nunca ocurren en la realidad. Pero ésta es una manera un tanto superficial de describir un hecho tan obvio y a la vez tan profundo como la diferencia entre pasado y futuro. Porque incluso sin experimento alguno nuestra propia experiencia subjetiva del pasado es completamente distinta de la del futuro. Recordamos el pasado y no recordamos el futuro. Nuestra conciencia de lo que puede ocurrir es de índole distinta de nuestra conciencia de lo que probablemente haya ocurrido. Desde un punto de vista psicológico, el pasado y el futuro son completamente distintos, con conceptos tales como memoria y aparente libre albedrío, en el sentido de que creemos poder hacer algo para influir sobre los acontecimientos futuros, mientras que nadie, o casi nadie, cree que pueda hacerse

algo que afecte al pasado. Remordimiento y esperanza son palabras que distinguen perfectamente el pasado del futuro.

Ahora bien, si la naturaleza está hecha de átomos y nosotros mismos estamos hechos de átomos que obedecen las leyes de la física, la interpretación más obvia de esta evidente distinción entre pasado y futuro sería que algunas leyes, algunas de las leyes del movimiento de los átomos, fueran irreversibles y no reversibles. Es decir, que en los entresijos hubiera algún tipo de principio por el cual de un coso sale una cosa, pero nunca a la inversa, de manera que el mundo iría siempre de coso a cosa, y que esta orientación unidireccional fuera la causa de que los hechos parezcan ir en un solo sentido.

Pero todavía no hemos descubierto ningún principio parecido. Es decir, en todas las leyes de la física descubiertas hasta el presente no parece que exista distinción alguna entre pasado y futuro. La película debería ser igualmente razonable en ambos sentidos y no levantar las carcajadas del físico que la está viendo.

Tomemos como ejemplo básico la ley de la gravedad. Si tengo un sol y un planeta y el planeta se mueve alrededor del sol en cierto sentido y lo voy filmando, si luego proyecto la película al revés, ¿qué observo? El planeta gira alrededor del sol en sentido opuesto, claro está, siguiendo una elipse. La velocidad del planeta es tal que el área cubierta por el radio en tiempos iguales es siempre la misma. En realidad, va exactamente como debería ir si girara en sentido opuesto. De manera que la ley de la gravedad es tal que la dirección no tiene efecto alguno. Si mostramos cualquier fenómeno en el que

solamente intervenga la fuerza de la gravedad mediante una película proyectada al revés, todo nos parecerá perfectamente satisfactorio. Esto puede formularse de forma más precisa de la siguiente manera: si todas las partículas de un sistema complejo vieran cada una de sus velocidades invertidas de forma instantánea, el sistema simplemente pasaría por todas las etapas anteriores. Si tenemos multitud de partículas haciendo algo y de pronto invertimos sus velocidades, las partículas desandarán exactamente lo que habían andado.

Esto está implícito en la ley de la gravedad, la cual afirma que los cambios de velocidad son resultado de la aplicación de fuerzas. Si invierto el tiempo, las fuerzas no cambian, por lo que los cambios de velocidad no se alteran a lo largo de las distancias correspondientes. Así pues, los cambios de cada velocidad se suceden de forma exactamente opuesta a como ocurrían antes; es fácil demostrar que la ley de la gravedad es reversible en el tiempo.

¿Y las leyes de la electricidad y el magnetismo? Reversibles en el tiempo. ¿Y las leyes de las reacciones nucleares? Hasta donde sabemos, también reversibles en el tiempo. ¿Y la ley de la desintegración beta de la que hemos hablado antes? Las dificultades surgidas en los experimentos recientes antes mencionados, que indican que ahí pasa algo desconocido, apuntan a la posibilidad de que, efectivamente, la desintegración beta no sea reversible, por lo que habrá que esperar a que se hagan más experimentos. Pero al menos es cierto lo siguiente: la desintegración beta (que puede o no ser reversible con respecto al tiempo) es un fenómeno carente de

importancia en la mayoría de casos. La posibilidad de que yo les esté hablando no depende de la desintegración beta, aunque ciertamente depende de reacciones químicas, de fuerzas eléctricas, no demasiado por el momento de las fuerzas nucleares, pero sí de la gravedad. Sí, soy unilateral (hablo y de mi boca sale una voz que se pierde en el aire; no se da el caso de que mi voz vuelva a mi boca cuando la abro), pero esta irreversibilidad no puede atribuirse al fenómeno de la desintegración beta. En pocas palabras, creemos que la mayoría de los fenómenos naturales comunes, que son el resultado de movimientos atómicos, obedecen a leyes que son completamente reversibles. Así pues, habrá que buscar más para dar con la explicación de la irreversibilidad.

Si observamos nuestros planetas girando alrededor del Sol, pronto nos damos cuenta de que no todo es perfecto. Por ejemplo, la rotación de la Tierra alrededor de su eje va haciéndose cada vez un poco más lenta. Este fenómeno se debe a la fricción de las mareas, y la fricción es algo obviamente irreversible. Si deposito un objeto pesado sobre el suelo y le doy un empujón, se deslizará algo hasta acabar parándose. Puedo esperar sentado a que súbitamente se ponga en movimiento en dirección a mi mano. Parece, pues, que los efectos de fricción son irreversibles. Pero estos efectos, como ya hemos visto, son resultado de la enorme complejidad de las interacciones del objeto pesado con la superficie por la que se desliza. El movimiento organizado del objeto se transforma en los saltos y cabriolas irregulares y desorganizados de los átomos de la

superficie. Así pues, tenemos que observar todo esto con más detalle.

En realidad, hemos dado con la clave de la aparente irreversibilidad. Voy a poner un ejemplo muy simple. Supongamos que en un recipiente tenemos separadas por un lado agua transparente y por otro agua de color azul teñida con tinta. Si con suma delicadeza levantamos la separación, el agua al principio se mantiene transparente a un lado y azul al otro. Pero si esperamos un poco veremos cómo gradualmente ambas aguas se van mezclando hasta que se obtiene un color azul pálido uniforme. Si nos quedamos observando el contenido del recipiente nunca veremos cómo las dos aguas vuelven a separarse. (Es cierto que podría hacerse algo para conseguir el color azul inicial. Por ejemplo, podría calentarse el agua hasta evaporarla para condensarla en otro lugar, recoger a continuación el tinte azul, disolverlo en la mitad del agua y dejarlo todo como al principio; pero mientras hacemos todo esto nosotros mismos estamos causando fenómenos irreversibles en otra parte.) La separación no ocurre de forma espontánea.

Esto nos da alguna pista. Fijémonos en las moléculas. Supongamos que filmamos la mezcla del agua transparente y el agua azul. Si proyectáramos la película al revés, nos parecería chocante que partiendo de un agua de color uniforme se llegara a la separación de dos aguas de colores distintos: una locura. Ahora ampliemos tanto la película que cualquier físico pueda seguir el proceso molécula a molécula para descubrir dónde reside la irreversibilidad, en qué momento las leyes del equilibrio entre lo pasado y lo futuro se

rompen. Empecemos a mirar la película. Vemos moléculas de dos tipos (ya sé que es ridículo, pero llamémosles azules y blancas) bailando sin parar en agitación térmica. Al principio tenemos moléculas blancas a un lado y azules al otro. Pero estos millones y millones de moléculas se mueven sin parar de un lado para otro, y su movimiento perpetuo e irregular hace que acaben mezclándose. Es por esto por lo que el agua adquiere un color azulado más o menos uniforme.

Si nos fijamos en cualquier colisión concreta entre moléculas, veremos que dos moléculas se aproximan una a otra, chocan y salen rebotadas. Si pasamos esta escena de la película al revés, vemos también moléculas que se aproximan, chocan y salen rebotadas. El físico que observa todo esto con su inquisitiva mirada y hace las medidas pertinentes concluye que todo ocurre según las leyes de la física. Si dos moléculas vienen de esta dirección, saldrán rebotadas en esta otra. El proceso es reversible, y lo es porque las leyes que rigen las colisiones moleculares son reversibles.

Así pues, si uno observa el proceso con demasiada precisión no hay forma de entenderlo, porque cada una de las colisiones es absolutamente reversible, mientras que la película proyectada al revés muestra un proceso absurdo, porque se observa que moléculas inicialmente mezcladas (azul, blanca, azul, blanca, azul, blanca) se van separando como producto de las colisiones entre ellas. Pero esto no puede ser: no es natural que las moléculas azules acaben separándose de las blancas de forma puramente accidental. Sin embargo, si se observa la película al revés con la suficiente

resolución, todo parece correcto. Así pues, parece claro que al final la irreversibilidad no es más que el resultado de los accidentes generales de la vida. Si se parte de algo que está separado y sujeto a cambios irregulares, acaba haciéndose cada vez más uniforme. Pero si es uniforme de entrada y se producen cambios irregulares, no acaba separándose. Ahora bien, esto *podría* ocurrir. No es contrario a las leyes de la física que las colisiones entre las moléculas contribuyan a separarlas. Simplemente, es improbable. Una cosa así no ocurrirá en millones de años. Esta es la respuesta. Los procesos son irreversibles sólo en la medida en que un sentido es probable mientras que el opuesto, aunque posible según las leyes de la física, no se dará en millones de años. Es simplemente ridículo pensar que con tal de esperar un buen rato veremos que el movimiento de las moléculas acabará separando una mezcla uniforme de agua y tinta en agua por un lado y tinta por otro.

Por otra parte, si efectuamos el experimento dentro de un recipiente que contenga sólo cuatro o cinco moléculas de cada clase, en este caso sí es plausible suponer que, con un poco de paciencia, y no necesariamente después de millones de años, acabaremos viendo cómo las moléculas vuelven a una distribución similar a la inicial como resultado de las colisiones accidentales, al menos en el sentido de que, si colocásemos una barrera en medio de la caja, todas las moléculas blancas estarían a un lado y las azules al otro. No es imposible. Sin embargo, los objetos que manejamos habitualmente no tienen cuatro o cinco moléculas blancas y azules, sino cuatro o cinco millones de millones de millones. Así pues, la

aparente irreversibilidad de la naturaleza no surge de la irreversibilidad de las leyes fundamentales de la física, sino del hecho de que, si se parte de un sistema ordenado y se deja a merced de los accidentes de la naturaleza (las colisiones moleculares), el sistema cambia en un único sentido.

La cuestión siguiente es: ¿de dónde surge el orden en primera instancia? En otras palabras, ¿cómo es posible partir de un estado ordenado? La dificultad radica en que empezamos con un sistema ordenado y acabamos en el desorden. Nunca se llega a otro estado ordenado. Una de las reglas del mundo es que se pasa del orden al desorden. Entre paréntesis: el término orden, como el término desorden, es otro concepto físico que no significa exactamente lo mismo que en el lenguaje cotidiano. A nosotros, como seres humanos, no tiene por qué resultarnos atractivo el orden; simplemente, existen unas situaciones definidas (todas las azules a un lado y todas las blancas a otro, o bien todas mezcladas) ordenadas y desordenadas.

Se trata, pues, de averiguar cómo se adquiere el orden en primera instancia y por qué cuando observamos cualquier situación corriente parcialmente ordenada podemos afirmar que procede de una aún más ordenada. Si observo un depósito con agua de color azul oscuro en un lado, transparente en el opuesto y de un color celeste en el centro, y sé que la cosa se ha dejado evolucionar desde hace veinte o treinta minutos, mi conclusión será que la separación entre el agua azul y el agua clara era aún más nítida en el pasado. Si espero más tiempo, el azul y el blanco se mezclarán aún más, y si

sé que hace bastante tiempo que se ha iniciado el experimento, puedo llegar a conclusiones sobre su estado en el pasado. El hecho de que los colores sean más nítidos hacia los bordes es una indicación de que en el pasado estaban más separados; de no ser así, los colores estarían aún más mezclados de lo que están. Es, pues, posible hacer afirmaciones sobre el pasado a partir del presente.

Normalmente los físicos no llegan a tanto. Se contentan creyendo que les basta con preguntarse: «Dadas estas condiciones, ¿qué va a pasar a continuación?». Pero las demás ciencias se enfrentan a un reto completamente distinto. Todas las demás disciplinas (historia, geología, cosmología) tienen que dar respuesta al problema inverso. Deben ser capaces de hacer predicciones de una clase completamente distinta. Un físico dice: «En estas condiciones puedo anticipar lo que va a suceder a continuación», mientras que el geólogo dice algo así: «En mis excavaciones he encontrado cierto tipo de huesos; mi predicción es que si continuamos excavando encontraremos huesos similares». El historiador, aunque se refiera al pasado, puede también hablar en futuro.

Cuando dice que la Revolución francesa tuvo lugar en 1789, está diciendo que si miramos en otro libro volveremos a encontrar la misma fecha para el mismo acontecimiento. Lo que hace es efectuar cierta predicción sobre algo que nunca ha visto antes, por ejemplo sobre documentos que todavía no se han descubierto. Su predicción es que los documentos en los que se habla de Napoleón coincidirán con lo que se ha escrito sobre él en otros documentos. La cuestión

es cómo es posible esto, y la única explicación es que en el pasado el mundo estaba más organizado (en sentido físico) que en el presente.

A veces se ha sugerido la siguiente explicación del orden universal. Al comienzo el universo entero no era más que movimiento irregular, como el agua mezclada. Hemos visto que si teníamos pocos átomos y esperábamos un tiempo suficiente el agua podía separarse por sí sola. Algunos físicos sugirieron (hace un siglo) que lo único que había ocurrido era que el mundo, este sistema que ha estado existiendo durante tanto tiempo, fluctuaba (éste es el término usado para indicar que un sistema se aparta de su condición uniforme habitual). El mundo experimentó una fluctuación en el pasado, y ahora estamos presenciando la vuelta a la normalidad. Alguien podría decir: «Pero ¿se da usted cuenta del tiempo que hay que esperar para que ocurra una fluctuación de ese calibre?». Lo sé, pero si el mundo no fluctuara lo suficiente para dar lugar a nuestra evolución (para producir una persona inteligente) no estaríamos aquí. De modo que nuestra propia existencia implica que en el pasado hubo al menos una fluctuación lo bastante grande para hacerla posible. Sin embargo, creo que esta teoría no es correcta. Creo que es una hipótesis ridícula por la siguiente razón: si el mundo fuera mucho mayor y al principio los átomos hubieran estado uniformemente mezclados, resulta que si miro hacia un lugar concreto y descubro que allí los átomos están separados, no tengo razón alguna para concluir que los átomos también estarán separados en cualquier otro sitio. De hecho, si descubriera algo

anormal, la mejor confirmación de que se trata de una fluctuación sería que nada extraño ocurriera en el resto del universo. Decir que hubo una fluctuación que afectó al universo entero es apostar muy fuerte, y esto siempre es peligroso. Volviendo al experimento del agua, cuando por fin algunas moléculas dentro de la caja se separan, la condición más probable del resto del agua continuará siendo la de mezcla. En consecuencia, aunque veamos un orden en el mundo que nos rodea, si realmente estuviéramos en una fluctuación la predicción sería que, si miramos hacia un lugar todavía no observado del firmamento, lo descubriríamos desordenado. Es decir, aunque la separación de la materia en estrellas calientes y espacio frío podría ser una fluctuación, en ese caso habría que esperar descubrir en lugares aún no observados la inexistencia de estrellas diferenciadas del espacio circundante. Puesto que predecimos que en los lugares aún no observados del firmamento también encontraremos estrellas parecidas a las que conocemos, o que descubriremos las mismas descripciones de Napoleón, o que hallaremos los mismos huesos de antes, el éxito de todas estas ciencias parece indicar que el mundo no surgió de una fluctuación, sino de una condición más ordenada en el pasado que en el presente. Por ello considero necesario añadir a las leyes de la física la hipótesis de que en el pasado el universo estaba más ordenado, en el sentido técnico, de lo que lo está hoy. Creo que ésta es la proposición adicional que se necesita para comprender la irreversibilidad.

Es evidente que esta proposición es en sí misma parcial con respecto al tiempo. Afirma que entre el pasado y el futuro hay una diferencia. Pero se trata de una proposición que se halla fuera del ámbito de las leyes de la física, en el sentido ordinario, ya que en la actualidad se suele distinguir entre el establecimiento de las leyes que gobiernan el mundo y el establecimiento de la condición del universo en el pasado. Esto se considera historia del cosmos (aunque puede que algún día pase a formar parte de las leyes de la física).

A continuación me gustaría dar ejemplos de irreversibilidad. Uno de ellos consiste en ver cómo funciona exactamente una máquina irreversible. Supóngase que construimos algo que solamente debe funcionar en un sentido. Lo que voy a construir es una rueda de trinquete, una rueda con muescas que por un lado tienen un corte vertical y por el otro son redondeadas. La rueda tiene un eje y hay un pequeño retén con un muelle que lo mantiene pegado a la rueda (véase figura 26).

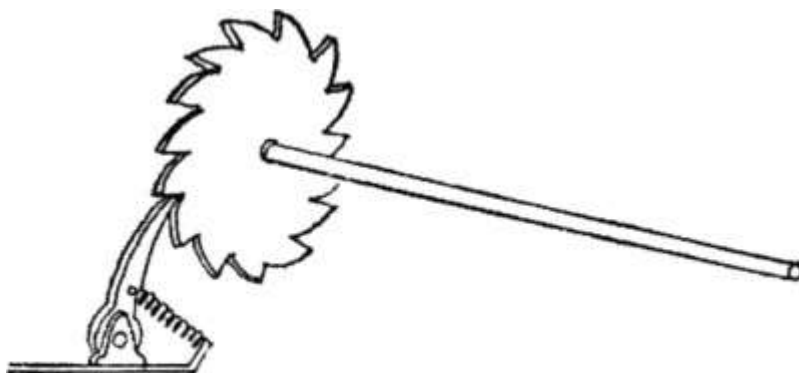


Figura 26

La rueda sólo puede girar en un sentido: si se intenta hacerla girar al revés, el retén se encastra en el lado vertical del diente y la rueda no avanza, mientras que en sentido contrario todo gira suavemente. Se trata, por lo tanto, de un aparato irreversible en el sentido de que la rueda sólo puede girar de una manera.

Ahora imaginemos que esta máquina irreversible, esta rueda que sólo puede girar en un sentido, se usa con un fin muy útil e interesante. Como sabemos, las moléculas están sometidas a un movimiento continuo e irregular, de manera que si construimos un instrumento lo bastante delicado, éste se moverá al ser bombardeado irregularmente por las moléculas de aire de su entorno. Como se trata de una idea muy brillante, vamos a conectar nuestra rueda de trinquete con un eje que lleva acopladas cuatro aspas, tal como se ve en la figura 27.

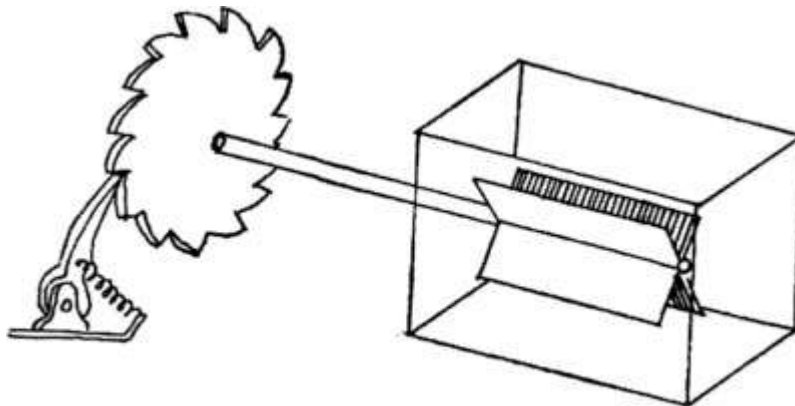


Figura 27

Las aspas están inmersas en una atmósfera gaseosa, por lo que son bombardeadas de forma continua e irregular por las moléculas del gas, de manera que unas veces son empujadas en un sentido y

otras en otro. Pero el retén sólo permite que las aspas giren cuando son empujadas en un sentido y no en el otro, con lo que obtenemos un mecanismo de movimiento perpetuo. Esto se debe a la irreversibilidad del movimiento de la rueda de trinquete.

Sin embargo, el asunto debe examinarse con más detalle. El mecanismo funciona de forma que cuando la rueda gira en una dirección levanta el retén, el cual vuelve a caer en la muesca. El retén vuelve a saltar y, si el muelle es perfectamente elástico, irá saltando y saltando y la rueda irá girando cada vez que el retén se levante. Pero este mecanismo no funcionará a menos que el retén impida efectivamente a la rueda girar en sentido contrario. Si el retén salta y retiene la rueda deberá producirse una resistencia, una fricción que generará calor, con lo que la rueda irá calentándose. Al alcanzarse cierta temperatura surge un nuevo fenómeno. Así como existe un movimiento browniano, es decir, un movimiento irregular del gas alrededor de las aspas, el aparato, al ir calentándose, empezará a moverse de manera cada vez más irregular, con independencia del material de que esté hecho. Llegará un momento en que la rueda estará tan caliente que el retén saltará debido simplemente al movimiento de las propias moléculas que lo constituyen, igual que las aspas. El retén saltará sobre la rueda y, como estará tanto tiempo bajado como levantado, la rueda se moverá tanto en un sentido como en otro, con lo que el instrumento dejará de girar sólo en un sentido. En realidad, ¡el aparato podría llegar a moverse únicamente en sentido opuesto! Si la rueda está caliente y las aspas frías, la rueda empezará a girar en sentido

contrario, porque cada vez que el retén caiga resbalará sobre el borde inclinado de un diente y empujará la rueda «hacia atrás». De manera que, si la rueda está más caliente que las aspas, entonces girará en sentido opuesto.

¿Qué tiene esto que ver con la temperatura del gas que rodea las aspas? Supongamos por un momento que no hay aspas. La rueda será empujada por el retén al caer éste sobre el borde inclinado del diente pero, acto seguido, la rueda chocará con el retén y rebotará hacia atrás. Las aspas, al ser frenadas por el aire, actúan como un amortiguador que impide el rebote de la rueda. De esta manera la rueda sólo girará en un sentido, pero opuesto al previsto. Así pues, sea cual sea el diseño del aparato, una rueda de este tipo girará en un sentido cuando la rueda esté más caliente que las aspas y en el otro en caso contrario. Ahora bien, una vez haya tenido lugar un intercambio térmico entre las dos partes y ambas posean la misma temperatura, la rueda no se moverá, por término medio, ni en un sentido ni en el otro. Esta es una descripción técnica de cómo los fenómenos de la naturaleza proceden en un sentido mientras hay un desequilibrio, es decir, mientras un lado está más caliente que el otro, o mientras un lado es más azul que el otro.

Alguien podría pensar que el principio de conservación de la energía establece que la energía es inagotable. La naturaleza ni gana ni pierde energía. Sin embargo, la energía del mar, por poner un ejemplo, el movimiento térmico de los átomos del mar, está fuera de nuestro alcance a efectos prácticos. Para canalizar esa energía, para poder utilizarla, necesitamos una diferencia de temperatura; de otro

modo, por mucha energía que contenga el océano, no puede inutilizarse.

El principio de conservación de la energía dice que la energía total del mundo se mantiene constante. Pero, debido a los movimientos erráticos de las partículas, en determinadas circunstancias esta energía puede estar distribuida de manera tan uniforme que no sea posible extraer más energía de la que se añade, es decir, que no haya forma de controlarla.

Creo que una analogía puede ayudar a hacerse una idea de la dificultad. No sé si alguno de ustedes habrá pasado por la experiencia, que yo conozco bien, de estar sentado en la playa con varias toallas cuando de pronto empieza a caer un chaparrón. Rápidamente agarramos las toallas y corremos a cobijarnos. Una vez protegidos de la lluvia empezamos a secarnos y descubrimos que la toalla está un poco húmeda, pero no tanto como nuestro cuerpo, de manera que vamos secándonos con ella hasta que llega un momento en que está demasiado empapada, es decir, que nos seca tanto como nos moja. Probamos con otra toalla y muy pronto descubrimos algo terrible: que todas las toallas están tan mojadas como nuestro cuerpo. Ya no hay manera de secarse más aunque tengamos varias toallas, porque ya no hay diferencia entre lo mojados que estamos nosotros y lo mojadas que están las toallas. Podría inventar una nueva magnitud llamada «facilidad de secar el agua». La toalla posee la misma facilidad de secar el agua que nosotros, por lo que cada vez que paso la toalla por mi cuerpo pasa tanta agua de mi piel a la toalla como de la toalla a mi piel.

Esto no significa que haya la misma cantidad de agua en la toalla que sobre mi cuerpo (una toalla grande contendrá más agua que una pequeña), pero tienen la misma humedad. Cuando todo adquiere el mismo grado de humedad ya no hay nada que hacer.

El agua es como la energía, porque la cantidad total de agua no cambia. (Si de pronto sale el sol y nos podemos secar, o si encontramos otra toalla seca, entonces estaremos salvados, pero supongamos que estamos en un lugar cerrado y no hay forma de conseguir nuevas toallas.) De manera análoga, si imaginamos una parte del mundo como cerrada y esperamos el tiempo suficiente, la energía, como el agua, acabará distribuyéndose de manera uniforme (desaparecerá el movimiento en sentido único), hasta el punto de que el mundo perderá todo interés.

Así pues, en el caso del trinquete con aspas, que es un sistema limitado, la temperatura poco a poco se va unificando en ambas partes y la rueda deja de girar en un sentido u otro. Por la misma razón, si se espera el tiempo suficiente, cualquier sistema acabará teniendo su energía tan uniformemente distribuida que en realidad no habrá energía disponible para nada.

A propósito, lo que corresponde a la humedad o la «facilidad de secar el agua» es lo que llamamos temperatura. Cuando dos cosas tienen la misma temperatura se alcanza un equilibrio, aunque esto no significa que ambas contengan la misma energía, sino que es tan fácil extraer energía de una como de otra. La temperatura es equivalente a la «facilidad de extraer energía». Si se juntan dos objetos a la misma temperatura, no ocurre nada. Se transmite

energía en ambos sentidos, y el resultado neto es nulo. En consecuencia, cuando todo posee la misma temperatura, deja de existir energía disponible para lo que sea. El principio de irreversibilidad se traduce en que, si las cosas están a diferentes temperaturas y se dejan a su aire, a medida que pasa el tiempo van adquiriendo una temperatura cada vez más uniforme y la energía disponible va decreciendo sin parar.

Esta es otra manera de expresar la llamada ley de la entropía, que afirma que la entropía siempre aumenta. La palabra entropía es lo de menos: si damos la vuelta a la proposición, lo que significa es que la energía disponible siempre disminuye. Ésta es una propiedad del mundo, en el sentido de que se debe al movimiento caótico de las moléculas. Los objetos a distintas temperaturas tienden a adquirir una temperatura uniforme. Si tenemos dos cosas a la misma temperatura, como un cacharro con agua sobre una cocina apagada, no hay que confiar en que el agua se hiele y la cocina se caliente. Pero si tenemos un cacharro con hielo sobre una cocina encendida, ocurre lo contrario. Es decir, el sentido de los fenómenos siempre es hacia la pérdida de energía disponible.

Esto es todo lo que quería decir sobre el tema, aunque aún tengo que hacer algunas puntualizaciones. Acabamos de ver un ejemplo en el que un efecto obvio, la irreversibilidad, no es una consecuencia obvia de las leyes de la física; de hecho, está muy alejado de las leyes básicas. Hace falta un análisis profundo para comprender por qué. El efecto es de una importancia trascendental para el funcionamiento del mundo, para el comportamiento del

mundo real en todos sus aspectos obvios. Mi memoria, mi manera de ser, la diferencia entre el pasado y el futuro, están íntimamente relacionadas con este principio y, sin embargo, su comprensión no es una consecuencia inmediata de la comprensión de las leyes de la naturaleza. Hace falta un análisis profundo.

Ocurre con frecuencia que las leyes de la física no tienen una relevancia directa para la experiencia, sino que poseen diversos grados de abstracción. El hecho de que las leyes sean reversibles, mientras que los fenómenos naturales no lo son, es un buen ejemplo de ello.

A menudo existen grandes distancias entre el detalle de las leyes y los aspectos principales de los fenómenos reales. Por ejemplo, si observamos un glaciar desde cierta distancia, vemos grandes rocas arrastradas hacia el mar, el avance del hielo, etc., pero no necesitamos recordar que el glaciar está compuesto de pequeños cristales hexagonales de hielo. Sin embargo, el movimiento del glaciar es en gran medida consecuencia del carácter de los cristales hexagonales de hielo.

Pero lleva mucho tiempo comprender en toda su amplitud el comportamiento de un glaciar (en realidad nadie sabe lo suficiente sobre el hielo, por mucho que se hayan estudiado los cristales). Aun así, nuestra esperanza es que cuando realmente entendamos los cristales de hielo acabaremos entendiendo los glaciares.

En realidad, aunque en estas conferencias hemos estado hablando de los fundamentos de las leyes de la física, tengo que decir sin más demora que, aun conociendo todas las leyes fundamentales en su

forma actual, no es posible comprender de forma inmediata demasiadas cosas. Hace falta tiempo y, aun así, nuestro conocimiento es sólo parcial. La naturaleza parece estar hecha de tal manera que las cosas más importantes del mundo parecen ser el resultado accidental y complicado de la conjunción de muchas leyes.

Por poner un ejemplo, los núcleos atómicos, que incluyen protones y neutrones, son muy complicados. Poseen lo que denominamos niveles de energía, es decir, pueden hallarse en estados o condiciones con diferentes valores de energía. Además, núcleos distintos tienen distintos niveles de energía. Pues bien, localizar los niveles de energía es un problema difícil que sólo sabemos resolver parcialmente. La localización exacta de los niveles es una cuestión enormemente compleja, pero no hay ningún misterio en el hecho de que el nitrógeno, que contiene 15 partículas, tenga un nivel de 2,4 megaelectronvoltios (MeV), otro nivel de 7,1 MeV, etc. Lo verdaderamente notable de la naturaleza es que el carácter del universo entero dependa precisamente de la posición de un nivel concreto en un núcleo concreto. En el núcleo del carbono-12 existe un nivel de 7,82 MeV; y esto lo cambia todo.

La situación es la siguiente. Si partimos del hidrógeno, y parece que al principio el mundo prácticamente sólo contenía hidrógeno, a medida que los átomos de hidrógeno van apelotonándose y calentándose por efecto de la gravedad, comienza a haber reacciones nucleares que producen helio; a continuación el helio puede combinarse parcialmente con el hidrógeno para producir

elementos algo más pesados. Pero resulta que estos elementos más pesados enseguida se desintegran otra vez en helio. Por esta razón, durante mucho tiempo un misterio rodeó el origen de los restantes elementos, porque el proceso de cocción del hidrógeno en el interior de las estrellas sólo podía dar helio y apenas media docena más de elementos. Confrontados con este problema, los profesores Hoyle y Salpeter¹⁹ dieron una solución. Si se juntan tres átomos de helio se puede formar carbono, y es fácil calcular la probabilidad de este suceso en el interior de una estrella. Pues bien, resultó que esta probabilidad era prácticamente nula, a menos que se diera una eventualidad: si existiera un nivel de energía en el carbono de 7,82 MeV, entonces podrían coincidir tres átomos de helio y permanecer unidos durante más tiempo, por término medio, del que lo estarían si no existiera dicho nivel. Además, bastaría este tiempo de más para que ocurrieran cosas nuevas y se formaran los demás elementos. Así pues, de existir un nivel de 7,82 MeV en el carbono se podría explicar el origen de todos los demás elementos de la tabla periódica. Por inversión de este argumento se predijo la existencia de este nivel en el carbono; experimentos de laboratorio posteriores confirmaron la predicción. Así pues, la existencia del resto de elementos químicos está estrechamente ligada a la existencia de este nivel de energía particular del carbono. Sin embargo, las leyes de la física nos presentan la localización de este nivel en el carbono como un accidente complicadísimo, producto de la interacción de 12 partículas.

¹⁹ Fred Hoyle, astrónomo británico, Cambridge. Edwin Salpeter, físico estadounidense, Cornell University.

Este ejemplo es una excelente ilustración del hecho de que el conocimiento de las leyes de la física no necesariamente nos proporciona una comprensión directa de los hechos más significativos de la naturaleza. Los detalles de la experiencia real se hallan a menudo muy alejados de las leyes fundamentales.

Este ejemplo es una excelente ilustración del hecho de que la comprensión de las leyes físicas no necesariamente te da una comprensión de las cosas importantes del mundo de forma directa. Los detalles de la experiencia real a menudo están muy lejos de las leyes fundamentales. Tenemos una forma de discutir el mundo, cuando hablamos de él en varias jerarquías o niveles. Ahora bien, no pretendo ser muy preciso, dividiendo el mundo en niveles definidos, pero indicaré, describiendo un conjunto de ideas, lo que entiendo por jerarquías de ideas. Por ejemplo, en un extremo tenemos las leyes fundamentales de la física. Luego inventamos otros términos para conceptos que son aproximados, que, creemos, tienen su explicación última en términos de las leyes fundamentales. Por ejemplo, 'calor'. Se supone que el calor se agita, y la palabra para algo caliente es solo la palabra para una masa de átomos que se agitan. Pero por un tiempo, si hablamos de calor, a veces nos olvidamos de los átomos moviéndose, al igual que cuando hablamos del glaciario, no siempre pensamos en el hielo hexagonal y los copos de nieve que cayeron originalmente. Otro ejemplo de lo mismo es un cristal de sal. Visto fundamentalmente, son muchos protones, neutrones y electrones; pero tenemos este concepto de

"cristal de sal", que ya conlleva un patrón completo de interacciones fundamentales. Una idea como la presión es la misma. Ahora bien, si subimos más de esto, en otro nivel tenemos propiedades de sustancias - como "índice de refracción", cómo se dobla la luz cuando atraviesa algo; o "tensión superficial", el hecho de que el agua tiende a juntarse, los cuales se describen con números. Les recuerdo que tenemos que pasar por varias leyes para descubrir que es la atracción de los átomos, y así sucesivamente. Pero todavía decimos "tensión superficial", y no siempre nos preocupamos, cuando hablamos de tensión superficial, por el funcionamiento interno.

En, arriba en la jerarquía. Con el agua tenemos olas, y tenemos algo parecido a una tormenta, la palabra "tormenta" que representa una enorme masa de fenómenos, o una "mancha solar", o "estrella", que es una acumulación de cosas. Y no vale la pena pensarlo siempre en el pasado. De hecho, no podemos, porque cuanto más arriba vamos, más pasos tenemos en la apuesta, cada uno de los cuales es un poco débil. No los hemos pensado en todos todavía. A medida que subimos en esta jerarquía de complejidad, llegamos a cosas como contracciones musculares o impulsos nerviosos, que es una cosa tremendamente complicada en el mundo físico, que involucra una organización de la materia en una complejidad muy elaborada. Luego vienen cosas como 'rana'

Si continuamos por este camino, llegamos a palabras y conceptos como «hombre», «historia», «razones de Estado», etc., una serie de conceptos que utilizamos para comprender cosas a un nivel aún

más alto. Y si continuamos subiendo llegamos a cosas como mal, belleza, esperanza...

Si me permiten usar una metáfora religiosa, ¿qué extremo está más cerca de Dios? ¿Belleza y esperanza o leyes fundamentales? Creo que la respuesta adecuada es, sin duda, que tenemos que fijarnos en la interconexión de las estructuras, y que todas las ciencias (y no sólo las ciencias, sino los esfuerzos intelectuales de toda clase) son un intento de entender las conexiones entre los niveles jerárquicos, de conectar la belleza con la historia, la historia con la psicología humana, la psicología humana con el funcionamiento del cerebro, el cerebro con el impulso nervioso, el impulso nervioso con la química, y así sucesivamente, arriba y abajo, en ambos sentidos. Hoy por hoy no podemos trazar, y es absurdo intentar convencernos de lo contrario, el camino exacto que va de un extremo a otro, porque sólo recientemente hemos empezado a darnos cuenta de que existe esta jerarquía relativa.

Tampoco creo que haya un extremo más cercano a Dios. Es un error encaminarse hacia uno de los extremos con la esperanza de que ahí se encuentre la clave de una comprensión completa del mundo. Es un error aferrarse únicamente al mal, la belleza y la esperanza o, por otro lado, a las leyes fundamentales con la ilusión de alcanzar una comprensión más profunda del mundo. Es insensato que tanto los que se especializan en un extremo como los que se especializan en el otro muestren tal desinterés mutuo (aunque, en realidad, no sea tan grande como se dice). La gran masa de los que trabajan en las etapas intermedias, haciendo de puente entre un nivel y otro,

está continuamente incrementando nuestra comprensión del mundo y haciendo posible que vayamos entendiendo cada vez mejor el complejo entramado de las interconexiones entre jerarquías.

Capítulo 6

Probabilidad e incertidumbre

La visión de la naturaleza a través de la mecánica cuántica

En los orígenes de la observación experimental, o cualquier otro tipo de observación de carácter científico, era la intuición (que, en realidad, está basada en la experiencia simple de los objetos cotidianos) la que sugería las explicaciones razonables de los fenómenos. Pero a medida que intentamos abarcar un campo más amplio de hechos y dar explicaciones más consistentes de lo que vemos, las explicaciones simples dejan paso a lo que llamamos leyes. Una curiosa característica de estas leyes es que a menudo parecen hacerse cada vez menos razonables y más alejadas de lo que resulta intuitivamente obvio. Por ejemplo, en la teoría de la relatividad se afirma que si uno piensa que dos cosas ocurren al mismo tiempo, esto no es más que una opinión, porque otra persona puede llegar a la conclusión de que un suceso precedió al otro. Es decir, que la simultaneidad es una mera impresión subjetiva.

No hay razón para esperar otra cosa, puesto que los objetos de nuestra experiencia cotidiana o bien están formados por grandes cantidades de partículas, o bien se mueven muy lentamente, o tienen lugar en condiciones especiales que representan una experiencia limitada de la naturaleza. Mediante nuestra experiencia directa sólo accedemos a una porción muy pequeña de los fenómenos naturales. Sólo mediante mediciones refinadas y una

cuidadosa experimentación podemos ampliar nuestra visión del mundo. Entonces descubrimos cosas insospechadas, más allá del alcance de nuestra imaginación. A diferencia de la ficción, que imagina cosas que en realidad no existen, la imaginación científica se estira al máximo para captar cosas que *sí* están ahí. Es de esto de lo que quiero hablar.

Empecemos con la historia de la luz. Al principio se pensó que la luz se comportaba de manera parecida a una lluvia de corpúsculos, como gotas de agua o balas de ametralladora. Las investigaciones posteriores dejaron claro que esto no era del todo cierto, puesto que la luz se comportaba en realidad como las ondulaciones del agua y otras ondas. Posteriormente, ya en el siglo XX, tras nuevas investigaciones, se rehabilitó la idea de que, en muchos aspectos, la luz se comportaba como un haz de partículas. El efecto fotoeléctrico permitía incluso contar esas partículas, que hoy llamamos fotones. Cuando se descubrieron por primera vez, los electrones parecían comportarse como partículas o balas. Investigaciones posteriores, como los experimentos de difracción de electrones, demostraron que también se comportaban como ondas. A medida que pasaba el tiempo iba creciendo la confusión en torno al comportamiento de todas estas cosas: que si partículas, que si ondas... Todo parecía indicar que se comportaban de las dos maneras.

Esta creciente confusión fue resuelta hacia 1925 o 1926 con la formulación de las ecuaciones correctas de la mecánica cuántica. Ahora sí sabemos cómo se comportan los electrones y la luz. El problema es cómo describirlo. Si digo que se comportan como

partículas estaré dando una falsa impresión; tan falsa como si digo que se comportan como ondas. Lo cierto es que se comportan a su propia e inimitable manera, que técnicamente podríamos llamar mecanocuántica. Su comportamiento no se parece a ninguna otra cosa que ustedes hayan visto antes. Nuestra experiencia de los hechos cotidianos es incompleta. El comportamiento de las cosas a muy pequeña escala es, simplemente, distinto. Un átomo no se comporta como un peso colgado de un muelle y oscilando; ni como una representación en miniatura del sistema solar con pequeños planetas orbitando a su alrededor; ni como algún tipo de nube que rodea el núcleo. No se comporta como nada que hayamos conocido antes.

Sin embargo, existe al menos una simplificación. Los electrones se comportan en este aspecto justo igual que los fotones; ambos están chiflados, pero de la misma manera.

Hace falta mucha imaginación para hacerse una idea de su comportamiento, puesto que se trata de describir algo completamente distinto de cualquier otra cosa conocida. Seguramente ésta es la conferencia más difícil de todas, en el sentido de que es abstracta, alejada de la experiencia cotidiana. Esto es inevitable. Si tengo que dar una serie de conferencias sobre el carácter de las leyes físicas, no puedo dejar de hablar de la descripción del comportamiento real de las partículas a pequeña escala. Se trata de una característica común a todas las partículas y, por ello, de carácter universal. Si quieren ustedes saber más

acerca del carácter de las leyes físicas, no podemos dejar de lado este aspecto de la cuestión.

Va a resultar difícil. Pero se trata más de una dificultad psicológica, emanada del tormento perpetuo a que se someten ustedes mismos al preguntarse cómo es ello posible, lo que no es más que el reflejo del deseo incontrolado, y totalmente baldío, de verlo todo en términos familiares. No voy a recurrir a la analogía; simplemente voy a describir lo que pasa. Hubo una época en que los periódicos decían que sólo doce hombres en el mundo entendían la teoría de la relatividad. No creo que esto ocurriera nunca. Es posible que en algún momento sólo hubiera un hombre que la entendiera, porque fue el primero en concebir la idea. Pero, una vez publicada, mucha gente entendió la teoría de la relatividad de una u otra forma, sin duda muchos más de una docena. En cambio, creo que puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica. De manera que les aconsejo que no se tomen esta conferencia demasiado a pecho, ni piensen que tienen que entender lo que voy a decir en términos de algún modelo familiar. Pónganse cómodos y disfruten de la charla. Voy a explicarles cómo se comporta la naturaleza. Si ustedes simplemente aceptan que las cosas pueden ser así, les va a parecer espléndido y maravilloso. Si pueden evitarlo, no insistan en preguntarse: «¿Cómo es posible?», porque se meterán en un callejón del que nadie ha conseguido salir todavía. Nadie sabe cómo es posible.

Vayamos, pues, al grano y déjenme describirles el comportamiento típicamente mecánicocuántico de los electrones y fotones. Voy a

intentarlo mediante una mezcla de analogía y contraste. Si fuera pura analogía fracasaríamos; tenemos que razonar por analogía y contraste con cosas que nos resulten familiares. Cuando hable de partículas usaré la imagen de las balas, y cuando hable de ondas recurriré a las ondulaciones de la superficie del agua. Lo que voy a hacer es idear un experimento particular y contarles primero qué ocurriría si se usaran partículas, y después qué cabría esperar si se usaran ondas, para acabar explicando lo que ocurre cuando el experimento se hace con electrones o fotones verdaderos. Voy a servirme únicamente de este experimento, que ha sido diseñado para contener todo el misterio de la mecánica cuántica, para enfrentarnos de pleno a las paradojas, los misterios y las peculiaridades de la naturaleza. Cualquier otra situación en mecánica cuántica puede siempre explicarse diciendo: «¿Recuerdas el caso del experimento de los dos agujeros? Pues es lo mismo». Paso, pues, a describir el experimento de los dos agujeros. Ahí está contenido todo el misterio. No intento escamotearles nada; estoy ofreciéndoles la naturaleza en su forma más elegante y difícil.

Empecemos con las balas (figura 28). Supóngase que tenemos una ametralladora que dispara balas a través de un agujero en una plancha blindada. A bastante distancia hay una segunda plancha blindada con dos agujeros. Como voy a referirme constantemente a ellos, los llamaré n° 1 y n° 2 (los famosos dos agujeros). Imagínense unos agujeros redondos en tres dimensiones (el dibujo es sólo un corte transversal). De nuevo a bastante distancia situamos una pantalla en la que podamos instalar un detector, que para las balas

puede ser una simple caja con arena que nos permita recogerlas y contarlas. Voy a emprender una serie de experimentos en los que quiero contar el número de balas que recoge la caja de arena en distintas posiciones. Llamaré x a la altura de la caja sobre la pantalla.

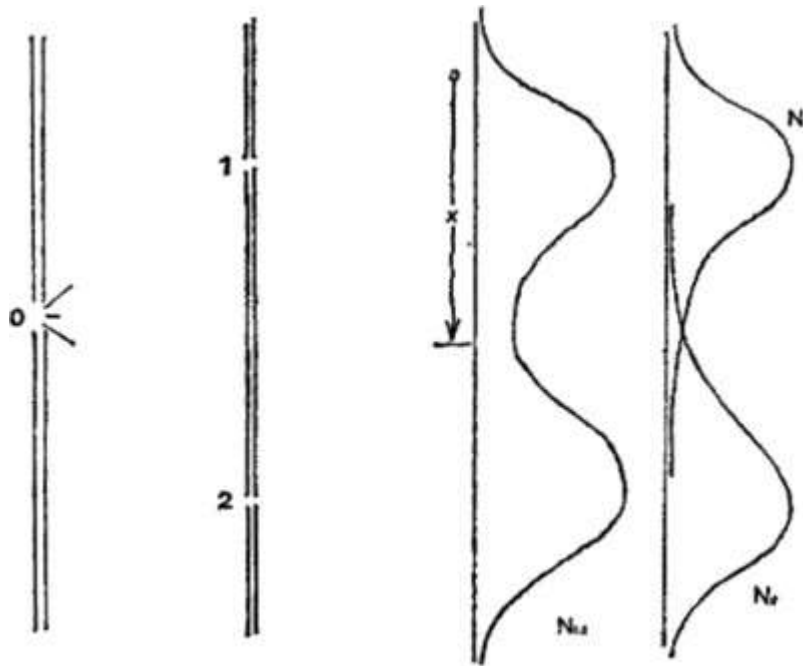


Figura 28

Quiero describir lo que ocurre cuando se cambia x , es decir, cuando desplazo el detector arriba y abajo. Pero antes quisiera introducir tres idealizaciones. La primera es que la ametralladora está mal sujeta, por lo que baila mucho y las balas salen disparadas en varias direcciones, de manera que algunas pueden rebotar en los bordes de los agujeros de la plancha blindada. En segundo lugar, todas las balas poseen la misma velocidad o energía, aunque esto no es demasiado importante. La tercera idealización, y la más

fundamental, es que las balas son indestructibles, de manera que siempre contaremos balas enteras y no fragmentos de plomo.

Lo primero que quiero subrayar con respecto a las balas es que representan unidades enteras. La energía que llega lo hace en forma de balazos. Si se cuentan las balas, tendremos una, dos, tres, cuatro... siempre unidades enteras. Supondremos que todas las balas son del mismo tamaño y que sólo pueden ir a parar dentro de la caja o fuera de ella. Además, si coloco dos cajas nunca se recogerá más de una bala al mismo tiempo. Hay que suponer que la ametralladora dispara lo bastante despacio para permitimos ver lo que ocurre entre disparos; habrá que espaciar los disparos y mirar enseguida las cajas para no contabilizar nunca más de una bala por disparo, puesto que una bala es una unidad identificable.

Lo que voy a medir es el número de balas que llegan por término medio a lo largo de un periodo de tiempo determinado, digamos una hora. Cada hora contamos el número de balas alojadas en la arena y sacamos el promedio. Al número de balas recogidas por hora lo podemos llamar probabilidad de llegada, porque nos da precisamente la probabilidad de que una bala cruce un agujero y se aloje en una caja determinada. El número de balas alojadas en la caja variará, claro está, en función de x . En la figura he representado horizontalmente el número de balas recibidas si mantengo la caja en cada posición durante una hora. De esta manera obtengo una curva parecida a la curva N_{12} , porque cuando la caja está detrás de uno de los agujeros recibe muchas balas, mientras que en otras posiciones recibirá menos balas, porque éstas

tendrán que rebotar en los bordes de los agujeros para llegar a la caja, y si la alejo más del centro acabará por no recibir ninguna. Así pues, la curva resultante se parece a N_{12} ; llamaré así al número de balas recibidas en una hora cuando ambos agujeros están abiertos. Debo recordarles que el número que he representado gráficamente no viene expresado en unidades enteras. Puede tomar cualquier valor. Puede ser dos balas y media por hora, a pesar de que las balas son unidades enteras. Lo que esto quiere decir es que si se realiza el experimento durante 10 horas, la caja recibirá 25 balas, o sea, una media de 2,5 balas por hora. Seguro que conocen el chiste sobre la familia media estadounidense que, según parece, tiene dos hijos y medio. Esto no significa que la familia tenga medio hijo: los hijos se tienen enteros. Sin embargo, el promedio por familia puede ser cualquier número, y por la misma razón N_{12} , que es el promedio de balas que llegan a la caja por hora, no tiene por qué ser un número entero. Lo que se mide es la probabilidad de llegada, que es una manera técnica de referirse al promedio de balas que llegan durante un periodo de tiempo dado.

Por último, si analizamos la curva N_{12} vemos que puede interpretarse perfectamente como la suma de dos curvas, una que representa lo que llamaré N_1 el número de balas que se recogen si el agujero nº 2 está cerrado, y otra correspondiente a N_2 , el número de balas que pasa por el agujero nº 2 si el nº 1 está cerrado. Con ello descubrimos una ley de gran importancia, que establece que el número de balas recogidas cuando ambos agujeros están abiertos es el número que llega a través del agujero nº 1 más el número que

llega a través del agujero n° 2. A esta ley, que nos dice que sólo tenemos que sumar ambos números, la llamaré de «no interferencia».

$$N_{12} = N_1 + N_2 \text{ (no interferencia).}$$

Esto por lo que respecta a las balas. Ahora vamos a repetir el experimento con ondas (figura 29). La fuente de nuestras ondas será una gran mole que se deja caer al agua y luego se sube. La plancha blindada se convierte en un espigón con un agujero en medio. Bueno, quizá sea más sensato producir pequeñas ondulaciones en vez de grandes olas. Crearé las ondas con el dedo y como barrera pondremos un pedazo de madera con un agujero a través del cual pasan las ondas. A continuación pondremos una segunda barrera con dos agujeros y por último un detector. ¿Qué hacemos con el detector? Lo que tenemos que medir es la oscilación del agua. Por ejemplo, puedo colocar un pedazo de corcho sobre el agua y medir cómo sube y baja; lo que estoy midiendo en realidad es la energía del movimiento del corcho, que es exactamente proporcional a la energía de las ondas. Una cosa más: el movimiento debe ser muy regular y perfecto, de manera que las ondas estén igualmente espaciadas. Una cosa importante en este caso es que lo que medimos puede tomar cualquier valor. Estamos midiendo la intensidad de las ondas, o la energía del corcho, y si las ondas son muy tenues, si mi dedo sólo se mueve un poquito, el corcho apenas se balanceará. En cualquier caso, su oscilación será proporcional a

la intensidad de las ondas y podrá tener cualquier valor: no vendrá dada en unidades exactas del tipo todo o nada.

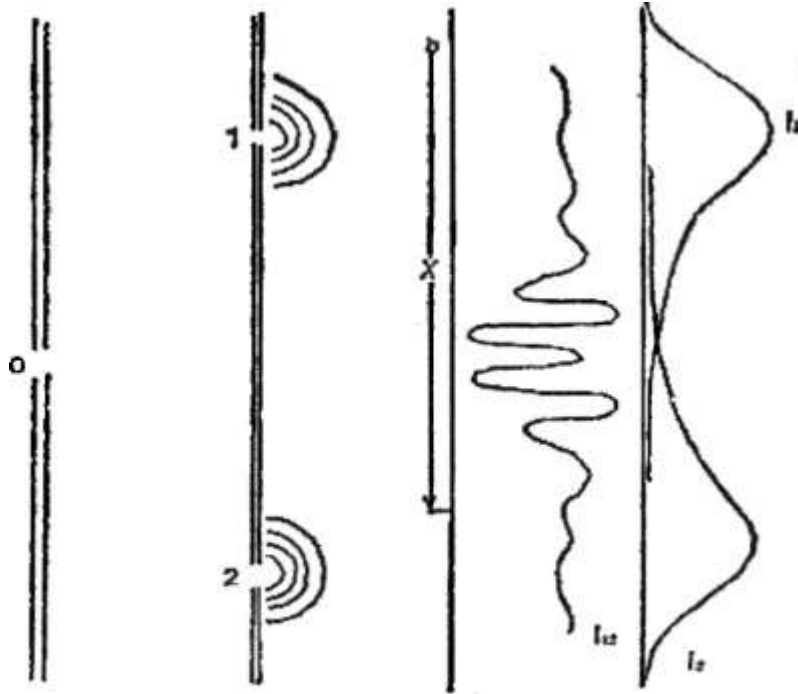


Figura 29

Lo que vamos a medir es la intensidad de las ondas o , para ser exactos, la energía generada por las ondas en un punto. ¿Qué ocurre cuando medimos la intensidad? (Que llamaré I para recordarles que se trata de una intensidad y no de un número de partículas.) La curva I_{12} , correspondiente a ambos agujeros abiertos, aparece en la figura 29. Es una curva interesante, de aspecto complicado. Si colocamos el detector en lugares distintos obtenemos una intensidad que varía muy rápidamente de una manera peculiar. Es probable que ustedes conozcan la razón de este comportamiento. Es porque las ondas tienen crestas y valles que parten del agujero

n° 1 y crestas y valles que parten del agujero n° 2. Si nos situamos justo en medio, de manera que las ondas procedentes de los dos agujeros lleguen al mismo tiempo, ambas crestas se superpondrán y el agua dará un buen salto. En cambio, si traslado mi detector a un punto más alejado del agujero n° 2 que del n° 1, las ondas procedentes de 2 tardarán más en llegar que las de 1, de manera que cuando llegue una cresta de 1, la cresta procedente de 2 no habrá llegado todavía; en realidad, de 2 llegará un valle de onda, con lo que el agua tratará de subir y bajar al mismo tiempo debido a la influencia de las ondas procedentes de uno y otro agujero, con el resultado neto de no moverse en absoluto o muy poco. Así que en este sitio apenas notaremos nada. Si continuamos desplazándonos llegará un momento en que el retraso de una de las ondas hará que vuelvan a coincidir dos crestas, aunque haya una oscilación completa de diferencia. Así pues, vamos obteniendo alternativamente un gran salto, uno pequeño, un gran salto, uno pequeño..., según la forma en que las crestas y los valles «interfieran». Una vez más, el término interferencia tiene un uso científico curioso. Podemos tener lo que se llama interferencia constructiva, como cuando ambas ondas generan un gran salto. Lo verdaderamente importante es darse cuenta de que I_{12} no es lo mismo que la suma de I_1 más I_2 , por eso hablamos de interferencia constructiva y destructiva. Podemos averiguar el aspecto de I_1 y de I_2 cerrando primero el agujero n° 2 y luego el n° 1. La intensidad que se obtiene si un agujero está cerrado es simplemente el resultado de las ondas que pasan por el otro agujero sin interferencia alguna, y

las curvas resultantes están dibujadas en la figura 29. Se observará que I_1 es idéntica a N_1 e I_2 idéntica a N_2 , mientras que I_{12} es muy distinta de N_{12} .

A decir verdad, las matemáticas de la curva I_{12} son muy interesantes. Es cierto que la altura del agua, que llamaremos h , cuando ambos agujeros están abiertos es igual a la altura que obtendríamos con el n° 1 abierto más la altura que obtendríamos con el n° 2 abierto. Por ello, si la altura del n° 2 representa un valle, se le dará un valor negativo que anulará la altura del n° 1. Podemos, pues, establecer dicha relación cuando se trata de la altura del agua, pero resulta que la intensidad en cualquier caso, como cuando ambos agujeros están abiertos, no es igual a la altura, sino proporcional al cuadrado de la altura. Es porque estamos tratando con cuadrados por lo que obtenemos una curva tan interesante.

$$h_{12} = h_1 + h_2$$

pero

$$I_{12} \neq I_1 + I_2 \quad (\text{Interferencia})$$

$$I_{12} = (h_{12})^2$$

$$I_1 = (h_1)^2$$

$$I_2 = (h_2)^2$$

Dejemos el agua y volvamos a empezar, esta vez con electrones (figura 30).

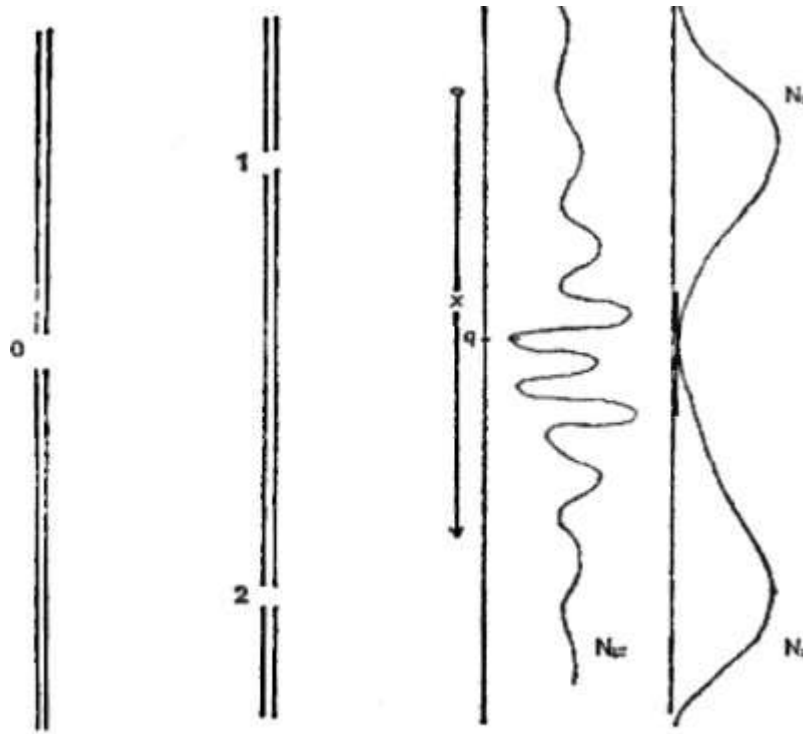


Figura 30

La fuente de electrones es un filamento, las barreras son ahora planchas de tungsteno con los correspondientes agujeros, y como detector utilizamos un sistema eléctrico lo bastante sensible para registrar la carga de cualquier electrón que llegue al aparato, por pequeña que sea la energía de la fuente. También podríamos utilizar fotones y papel negro en vez de electrones y planchas de tungsteno (aunque el papel negro no es muy apropiado, porque las fibras no permiten hacer agujeros de contornos precisos, por lo que habría que buscar algo mejor) y como detector un fotomultiplicador capaz de detectar la llegada de los fotones individuales. ¿Qué ocurre en estos casos? Voy a discutir solamente el experimento con electrones, puesto que el otro daría el mismo resultado.

En primer lugar, lo que registra el detector eléctrico, debidamente amplificado, son clics, unidades enteras. Cuando se oye el clic, la intensidad del sonido es siempre la misma. Si la fuente se debilita, los clics son igual de sonoros, pero más espaciados. Si se aumenta la intensidad de la fuente, los clics se suceden tan deprisa que el amplificador llega a saturarse. Es decir, hay que reducir la intensidad para que el instrumento que se utiliza para detectar la llegada de los electrones pueda funcionar adecuadamente. Hay que señalar también que si se coloca otro detector en un lugar distinto nunca se oirán dos clics al mismo tiempo, al menos si la fuente es lo bastante débil y el instrumento lo bastante preciso. Si se reduce la intensidad de la fuente de manera que los electrones lleguen lo bastante espaciados, nunca sonará simultáneamente un clic en ambos detectores. Esto significa que lo que está llegando se presenta en forma de unidades de una magnitud determinada y una detrás de otra. Así pues, los electrones, o los fotones, se dan en unidades; por lo tanto, podemos hacer lo mismo que hicimos en el caso de las balas: medir la probabilidad de llegada. Lo que hacemos es colocar el detector en posiciones distintas (o, si se prefiere, aunque es más caro, podemos colocar una hilera de detectores y trazar la curva de una vez). Mantenemos, pues, el detector en cada posición durante, digamos, una hora, medimos cuántos electrones han llegado y al cabo de varias horas calculamos el promedio. ¿Qué curva obtenemos? La figura 30 nos muestra lo que se obtiene con ambos agujeros abiertos. Lo extraordinario de la naturaleza es que produce una curva idéntica a la obtenida con la interferencia de las

ondas. Y la produce no en el caso de la energía de una onda, sino en el caso de la probabilidad de llegada de unidades enteras.

Las matemáticas son simples. No hay más que cambiar N por I , y h por otra cosa nueva (no se trata de la altura de nada). Nos inventamos una a a la que llamaremos amplitud de probabilidad, porque no sabemos lo que significa. En este caso a_1 es la amplitud de probabilidad de pasar por el agujero n° 1 y a_2 es la amplitud de probabilidad de pasar por el n° 2. Para determinar la amplitud de probabilidad total se suman las dos amplitudes parciales y se elevan al cuadrado, a imitación de lo que ocurre con las ondas, porque para hallar la curva equivalente utilizamos las mismas matemáticas.

Nos queda, sin embargo, una cuestión por verificar en relación con la interferencia. No he dicho nada de lo que ocurre cuando se tapa uno de los agujeros. Intentemos analizar esta interesante curva suponiendo que los electrones pasan sólo por un agujero o por otro. Cerramos el segundo y medimos cuántos electrones pasan por el n° 1, y obtenemos la curva simple N_1 . O bien cerramos el primero y medimos cuántos electrones pasan por el n° 2, con lo que obtenemos la curva N_2 . Pero la suma de esas dos curvas no da N_{12} ; esto quiere decir que hay interferencia. De hecho, matemáticamente, N_{12} viene expresada por una curiosa fórmula según la cual la probabilidad de llegada es el cuadrado de una amplitud que a su vez es la suma de dos partes: $N_{12} = (a_1 + a_2)^2$. La cuestión es explicar cómo es posible que cuando los electrones pasan a través del agujero n° 1 estén distribuidos de una manera,

que cuando pasan por el agujero n° 2 lo estén de otra y, sin embargo, cuando ambos agujeros están abiertos no se obtiene la suma de ambas distribuciones. Por ejemplo, si mantengo el detector en el punto q con ambos agujeros abiertos, no obtengo prácticamente nada, mientras que si cierro uno de ellos obtengo muchas señales, y si cierro el otro obtengo algunas. Pero en cuanto abro ambos agujeros no obtengo nada; les permito a los electrones que pasen a través de dos agujeros y no llega ninguno. Fijémonos en el punto central: se puede comprobar que ahí el valor es mayor que la suma de las dos curvas. Alguno de ustedes se creará lo bastante listo para encontrar una justificación de este fenómeno, como que los electrones entran y salen de los agujeros, o hacen algo más complicado, o se parten por la mitad y penetran por ambos agujeros. Sin embargo, nadie ha conseguido dar una explicación satisfactoria, y esto se debe, en última instancia, a la simplicidad de la expresión matemática de las curvas (figura 30).

Voy a resumir diciendo que los electrones llegan en unidades enteras, como partículas, pero la probabilidad de llegada de estas partículas se determina de la misma manera que la intensidad de las ondas. Es en este sentido en el que se dice que los electrones se comportan a veces como partículas y a veces como ondas. Se comportan de dos maneras distintas al mismo tiempo (figura 31).

Esto es todo lo que puede decirse. Podría dar una descripción matemática para hallar la probabilidad de llegada de los electrones bajo cualquier circunstancia y esto, en principio, sería el final de la conferencia; solo que todavía queda por dilucidar una serie de

sutilezas relacionadas con el hecho de que la naturaleza se comporte así. Hay un buen número de cosas curiosas que me gustaría discutir, porque no son autoevidentes.

CUADRO

<i>Balas</i>	<i>Ondas de agua</i>	<i>Electrones (fotones)</i>
En unidades enteras	Cualquier valor	En unidades enteras
Se mide la probabilidad de llegada	Se mide la intensidad de las ondas	Se mide la probabilidad de llegada
$N_{12} = N_1 + N_2$	$I_{12} \neq I_1 + I_2$	$N_{12} \neq N_1 + N_2$
Sin interferencias	Con interferencias	Con interferencias

Figura 31

Para discutir estas sutilezas empezaremos por analizar una proposición que, al tratarse de unidades enteras, debería parecer razonable. Puesto que lo que se detecta es siempre una unidad, en este caso un electrón, es obviamente razonable suponer que o bien el electrón pasa por el agujero n° 1 o bien lo hace por el n° 2. Parece completamente obvio que, tratándose de una unidad, no puede hacer otra cosa. Llamaré a esta afirmación «proposición A».

Proposición A:

*Un electrón o pasa
por el agujero n° 1 o*

pasa por el agujero n° 2.

Ya hemos dicho algo de lo que ocurre con la proposición A. Si fuera cierto que el electrón o pasa por el agujero n° 1 o pasa por el n° 2, el número total detectado tendría que ser la suma de ambas contribuciones. El número total detectado sería igual al número de electrones que pasaran por 1 más el número de electrones que pasaran por 2. Pero, puesto que la curva resultante no puede describirse de una manera tan fácil como la suma de dos componentes, y puesto que los experimentos que determinan el número de electrones llegados si sólo se abre un agujero no indican que el total sea la suma de las dos partes, parece claro que la proposición es falsa. Si no es cierto que el electrón pasa o por un agujero o por el otro, quizá sea porque temporalmente se divide o por alguna otra razón. La proposición A es falsa por lógica. Por desgracia, o por suerte, la lógica puede verificarse experimentalmente. Habrá que comprobar si los electrones pasan o por un agujero o por el otro o si, por el contrario, dan la vuelta por ambos agujeros, o se parten por la mitad, o alguna otra cosa.

Todo lo que hay que hacer es observarlos; y para observarlos necesitamos luz, así que detrás de los agujeros colocamos una fuente de luz intensa. La luz es dispersada por los electrones que chocan con ella, de manera que podremos verlos pasar si la luz es lo bastante intensa. Así pues, nos colocamos en nuestros puestos, dispuestos a ver si cada vez que contamos un electrón, o en el instante anterior, vemos un destello en el agujero 1 o en el 2, o

quizás una especie de medio destello en cada agujero. Por fin, con sólo mirar, vamos a descubrir qué pasa. Encendemos la luz, miramos y ¡ahí está!, cada vez que el detector recibe un electrón vemos un destello o en el agujero n° 1 o en el n° 2. Lo que vemos es que todas las veces el electrón pasa entero por uno de los agujeros. ¡Paradoja!

Vamos a ver si ponemos a la naturaleza en un aprieto. Les voy a decir lo que vamos a hacer. Vamos a dejar la luz encendida y vamos a contar cuántos electrones pasan. Haremos dos columnas, una para el agujero n° 1 y otra para el n° 2, y cada vez que llegue un electrón al detector lo anotaremos en la columna correspondiente al agujero por donde ha pasado. ¿Cómo se ve la columna del agujero n° 1 tras sumar todas las observaciones para las distintas posiciones del detector? Vemos la curva N_1 (figura 30). Esta columna muestra una distribución igual a la que obtenemos cuando tapamos el agujero n° 2, con independencia de si miramos o no. Es decir, que si tapamos el agujero n° 2 obtenemos la misma distribución de llegadas que cuando miramos el agujero n° 1. Igualmente, el número de electrones que han pasado por el n° 2 genera la curva simple N_2 . Fijémonos bien, el número total de electrones llegados *tiene que ser* igual al número total. Tiene que ser igual a la suma de N_1 más N_2 , puesto que cada electrón detectado ha sido asignado o bien a la columna 1 o bien a la 2. El número total de electrones detectados *tiene que ser absolutamente* igual a la suma de estos dos. Tiene que distribuirse como $N_1 + N_2$. ¿Pero no dijimos que se distribuía como la curva N_{12} ? Pues no, se distribuye

como $N_1 + N_2$. Realmente es así; tiene que ser así y es así. Si señalamos con una prima los resultados obtenidos con la luz encendida, tenemos que N'_1 es prácticamente idéntica a N_1 sin la luz, y N'_2 es casi igual a N_2 . Pero el número N'_{12} , que se obtiene con la luz encendida y ambos agujeros abiertos, es *igual* al número de electrones que pasan por 1 más el número de los que pasan por 2. Éste es el resultado obtenido con la luz encendida. Es decir, que obtenemos un resultado distinto según que la luz esté encendida o apagada. En el primer caso, la distribución es la curva $N_1 + N_2$. Si apagamos la luz, la distribución es N_{12} . Encendemos la luz de nuevo y otra vez es $N_1 + N_2$. ¡Pues vaya, la naturaleza ha escapado del aprieto! Habrá que concluir que la luz afecta al resultado. Podemos afirmar, por lo tanto, que la luz afecta al comportamiento de los electrones. Si se nos permite hablar de movimiento de los electrones a lo largo del experimento, lo cual es algo impreciso, podremos decir que la luz afecta al movimiento, de forma que los electrones que debían llegar a la zona de máxima densidad son de alguna manera desviados o golpeados por la luz, lo que suaviza la distribución hasta dar lugar a la curva simple $N_1 + N_2$.

Los electrones son muy delicados. Cuando observamos una pelota de tenis y le enfocamos una luz, la pelota no se desvía de su camino. Pero cuando enfocamos una luz sobre un electrón, éste es golpeado y su comportamiento se altera. Supóngase que probamos a reducir la intensidad de la luz hasta que es apenas perceptible y utilizamos unos detectores muy sensibles que pueden captar una luz muy tenue. Cabe esperar que una luz muy débil no afecte al

electrón tanto como para cambiar el resultado de N_{12} a $N_1 + N_2$. Cabe esperar que al debilitarse la luz nos acerquemos de alguna manera al caso de ausencia de luz. ¿Cómo se transforma una curva en la otra? Pero ahora no estamos tratando con una onda sobre el agua. La luz tiene características de partícula, denominada fotón, y a medida que se reduce la intensidad de la luz no se va eliminando su efecto; lo que hacemos es reducir el número de fotones que salen de la fuente de luz. A medida que reduzco la luz se emiten cada vez menos fotones. La cantidad mínima de luz que puede dispersar un electrón es un fotón, y si se emiten tan pocos fotones puede ocurrir que de vez en cuando se cuele un electrón cuando no pasa ningún fotón, en cuyo caso no lo veré. Por lo tanto, una luz muy tenue no significa una perturbación pequeña, sólo significa pocos fotones. El resultado es que tendré que incluir una tercera columna que diga «no vistos». Cuando la luz es muy intensa, esta columna estará casi vacía, pero cuando la luz sea débil la mayor parte de los electrones irán a parar ahí. De manera que tenemos tres columnas: agujero n° 1, agujero n° 2 y no vistos. Ya pueden imaginarse lo que ocurre. Los electrones vistos se distribuyen según la curva $N_1 + N_2$. Los no vistos se distribuyen según la curva N_{12} . A medida que reduzco la intensidad de luz veo cada vez menos electrones y pasan más sin ser vistos. En cualquier caso, la curva verdadera es una mezcla de las dos curvas, de forma que a medida que la luz se debilita se va pareciendo más y más a N_{12} de manera continua.

No puedo explicar ahora las muchas maneras distintas que hay de descubrir el agujero por el que pasó el electrón. Pero siempre resulta

que es imposible colocar la luz de tal forma que sea posible observar por qué agujero pasa cada electrón sin perturbar la distribución de los electrones que llegan, sin destruir la interferencia. Y no sólo en el caso de la luz; cualquier otro sistema de detección dará el mismo resultado. Pueden ustedes inventar mil y una maneras de detectar por qué agujero pasa cada electrón, pero si consiguen construir un instrumento tal que no perturbe el movimiento del electrón, entonces ya no será posible saber por qué agujeros pasan los electrones y se obtiene una vez más la curva complicada.

Heisenberg, uno de los padres de la mecánica cuántica, observó que las nuevas leyes de la naturaleza que acababa de descubrir sólo podían ser mutuamente consistentes si existía algún tipo de limitación básica en nuestras capacidades experimentales que no había sido previamente reconocida. En otras palabras, los procedimientos experimentales no pueden ser tan precisos como se quiera. Éste es el principio de incertidumbre de Heisenberg, que expresado en términos de nuestro experimento dice lo siguiente (él lo formuló de otra manera, pero ambas son equivalentes y es posible pasar de una formulación a otra): «Es imposible construir un aparato que pueda determinar el agujero por el que pasa un electrón sin al mismo tiempo perturbar al electrón lo suficiente para destruir el patrón de interferencia». Nadie ha conseguido escapar a esta ley. Estoy seguro de que todos ustedes están ya pensando en maneras de detectar el agujero por el que pasó el electrón, pero si se analiza cada una de ellas acabaremos descubriendo que inevitablemente algo falla. Uno puede creer que ha conseguido no

perturbar al electrón, pero siempre pasa algo, y siempre pueden explicarse los alejamientos del patrón de interferencia por la perturbación causada por los instrumentos usados para determinar el camino seguido por el electrón.

Ésta es una característica básica de la naturaleza, extensiva a todos los casos posibles. Si mañana se descubre una nueva partícula, digamos el kaón (en realidad esta partícula ya ha sido descubierta, pero la llamaré así de todas maneras), y empleo kaones para determinar el agujero por el que pasa cada electrón, ya sé lo suficiente de entrada (al menos así lo espero) a propósito del comportamiento de cualquier nueva partícula para decir que no puede permitirme decir por qué agujero pasa cada electrón sin que al mismo tiempo perturbe sus trayectorias y transforme el patrón de interferencia en uno de no interferencia. Así pues, el principio de incertidumbre puede aplicarse de forma general para anticipar muchos de los comportamientos de objetos desconocidos, cuyas probables características deben ocurrir entre ciertos límites.

Volvamos a la proposición A: «Los electrones deben pasar o por un agujero o por el otro». ¿Es verdad o no? Los físicos suelen eludir los escollos construyendo sus reglas de razonamiento de la siguiente manera: si poseemos un aparato capaz de indicarnos el agujero por el que pasa un electrón (*y es posible tener tal aparato*), podemos decir que pasa o por un agujero o por el otro. En efecto, un electrón siempre pasa por uno de los dos agujeros (cuando miramos). Pero cuando no poseemos aparato alguno para determinar por qué agujero ha pasado el electrón, no podemos decir que ha pasado por

uno de los dos agujeros. (Bueno, sí se puede *decir*, siempre y cuando no deduzcamos nada de ello; los físicos prefieren no decirlo a tener que dejar de pensar.) Concluir que un electrón ha pasado por uno de los dos agujeros cuando no estamos mirando implica incurrir en un error de predicción. Ésta es la cuerda lógica sobre la que hay que andar si queremos interpretar la naturaleza.

La proposición a la que me estoy refiriendo es de carácter general. No es sólo válida para el experimento de los dos agujeros, sino que puede generalizarse de la siguiente manera. La probabilidad de cualquier suceso en un experimento ideal (es decir, un experimento en el que todo esté tan bien especificado como sea posible) es el cuadrado de algo que he llamado a , la amplitud de probabilidad. Cuando un suceso tiene diversas alternativas, su amplitud de probabilidad es la suma de las a para cada una de las alternativas. Si se efectúa un experimento capaz de determinar la alternativa seguida, la probabilidad del suceso se convierte en la suma de las probabilidades de cada alternativa. Es decir, se pierde la interferencia.

La cuestión ahora es: ¿qué mecanismo subyace tras todo esto? Nadie lo conoce. Nadie puede dar una explicación del fenómeno más profunda que la que acabo de ofrecer: una mera descripción. Quizá pueda darse una explicación más detallada, en el sentido de poner más ejemplos para mostrar que es imposible averiguar por dónde pasa el electrón sin destruir la interferencia. Pueden elegirse experimentos más complicados que el de los dos agujeros. Pero la explicación sólo será más extensa, no más profunda. La formulación

matemática puede hacerse más rigurosa; se puede precisar que los números implicados son complejos y no reales, más un par de puntualizaciones secundarias que nada tienen que ver con la idea principal. Pero el misterio profundo es el que acabo de describir y, hoy por hoy, nadie puede ahondar más.

Lo que hemos calculado hasta ahora es la probabilidad de llegada de un electrón. Cabe preguntarse si hay alguna manera de averiguar en qué punto concreto incidirá un electrón individual. Por supuesto, no estamos en contra del cálculo de probabilidades cuando la situación es muy complicada. Cuando lanzamos un dado, y puesto que habría que tener en cuenta un sinfín de complicaciones, estamos dispuestos a admitir que no sabemos lo suficiente para hacer una predicción exacta; por ello calculamos las probabilidades de que salga una cara u otra. Pero lo que nos estamos preguntando ahora es si no habrá probabilidades hasta en lo más profundo, si las leyes fundamentales de la física son de carácter probabilístico.

Supongamos que tengo un experimento dispuesto de tal forma que con la luz apagada obtengo un patrón de interferencia. Lo que digo es que ni siquiera con la luz encendida puedo predecir por qué agujero pasará un electrón. Sólo sé que cada vez que miro pasa por uno de los dos agujeros, pero no hay manera de anticipar por cuál de ellos va a pasar. En otras palabras, el futuro es impredecible. Es imposible predecir, a partir de cualquier información previa, por qué agujero pasará o lo veremos pasar. Esto significa que, en cierto sentido, la física ha tirado la toalla, si es que su propósito original

era (y todo el mundo lo creía así) saber lo suficiente para, dadas unas circunstancias, poder predecir lo que ocurriría a continuación. Éstas son las circunstancias: una fuente de electrones, una poderosa fuente de luz, una plancha de tungsteno con dos agujeros. ¿Por cuál de los dos agujeros veré pasar el electrón? Una teoría afirma que la razón por la cual no es posible hacer una predicción de esta clase es que la trayectoria está determinada por una serie de cosas muy complicadas: haría falta conocer los engranajes internos del aparato que dispara los electrones, etc. La probabilidad es del 50 por ciento porque, al igual que ocurre con un dado, el resultado es aleatorio. La física es incompleta, pero si algún día llegamos a tener una física lo bastante completa seremos capaces de predecir por qué agujero pasará el electrón. Esta es la llamada teoría de variables ocultas. Pero tal teoría no puede ser cierta; no es la falta de información detallada lo que nos impide hacer predicciones.

He dicho que si no encendemos la luz obtenemos el patrón de interferencia. Es imposible analizar este experimento en términos de que cada electrón pasa por uno de los dos agujeros, porque la curva de interferencia es muy simple y, desde el punto de vista matemático, completamente distinta de la contribución conjunta de las otras dos curvas probabilísticas. Si hubiéramos podido determinar por anticipado el agujero por el que iba a pasar un electrón, el tener o no encendida la luz sería irrelevante para el resultado final. Fuera cual fuera el mecanismo de la fuente de electrones que nos permitiera anticipar la trayectoria del electrón, podríamos haberla conocido sin encender la luz y, en consecuencia,

habríamos podido decir, aun sin luz, por qué agujero iba a pasar el electrón. Pero de haber sido esto posible, la curva resultante habría podido representarse como la suma de los electrones que pasan por el agujero n° 1 más los que pasan por el n° 2, en contra de lo que realmente ocurre. Es, pues, imposible, ni con luz ni sin ella, disponer de información anticipada que nos indique por qué agujero pasará el electrón cuando el experimento está montado de manera que con la luz apagada se obtiene el patrón de interferencia. No es nuestra ignorancia de los mecanismos internos y sus innumerables complicaciones lo que hace que la naturaleza parezca tener carácter probabilístico. Parece ser algo intrínseco a ella. Alguien lo ha expresado así: «Ni siquiera la propia naturaleza sabe qué camino va a escoger el electrón».

Una vez un filósofo dijo: «Para la existencia misma de la ciencia es necesario que las mismas condiciones den siempre los mismos resultados». Bueno, pues las mismas condiciones no siempre dan los mismos resultados. Se dispone todo cada vez para que se mantengan las mismas condiciones y, sin embargo, resulta imposible predecir por dónde pasará el electrón. A pesar de esto, continuamos haciendo ciencia. Pero el que no podamos predecir exactamente lo que va a ocurrir nos tiene bastante descontentos. En relación con esto, cabría imaginar ciertas circunstancias muy peligrosas en las que *tuviéramos* que saber y, sin embargo, no pudiéramos hacer una predicción exacta. Por ejemplo, podríamos tener que decidir (esperemos que no) que si el electrón pasa por el primer agujero debemos hacer explotar una bomba atómica e iniciar

la tercera guerra mundial, mientras que si pasa por el segundo agujero continuamos negociando y retrasamos un poco más la guerra. En estas circunstancias, el futuro de la humanidad dependería de algo que la ciencia no puede predecir. El futuro es impredecible.

Ni lo que es necesario «para la existencia misma de la ciencia» ni las características de la naturaleza pueden determinarse mediante pomposas precondiciones. Estas cosas están determinadas por el material con el que trabajamos, por la propia naturaleza. Observamos y examinamos lo que descubrimos, pero no podemos predecir sin riesgo a equivocarnos. Las posibilidades más razonables a menudo resultan ser falsas. Si la ciencia tiene que progresar, lo que necesitamos es capacidad experimental, honestidad en la publicación de los resultados (que deben darse a conocer sin que nadie nos diga cuáles debieran haber sido) y, por último, inteligencia para interpretarlos. Una cuestión importante con respecto a la inteligencia es que no conviene estar seguros por anticipado de lo que se espera encontrar. La inteligencia puede estar cargada de prejuicios: «Esto es poco probable, esto no me gusta». Pero el prejuicio es distinto de la certeza absoluta. No me refiero a las preferencias personales, sino al prejuicio absoluto. Si se trata sólo de preferencias no hay cuidado porque, de estar equivocados, la acumulación de resultados en contra acabará obligándonos a transigir. Sólo es posible ignorarlos si estamos absolutamente convencidos de que la ciencia exige ciertas precondiciones. En realidad, para la existencia misma de la ciencia es necesario que

existan cabezas que no acepten que la naturaleza deba cumplir ciertas condiciones preconcebidas, como las de nuestro filósofo.

Capítulo 7

En busca de nuevas leyes

En esta conferencia no voy a hablar del carácter de las leyes físicas en sentido estricto. Cuando se habla de las leyes físicas, cabe suponer que se está hablando de la naturaleza; pero en esta ocasión no quiero hablar de la naturaleza, sino de nuestra posición actual en relación a la naturaleza. Quiero hablar de lo que creemos saber, de lo que queda por descubrir y de cómo nos las arreglamos para entrever cosas nuevas. Alguien ha sugerido que sería perfecto que a lo largo de la charla pudiera explicar con detalle cómo descubrir una ley y acabar creando una nueva ley para ustedes. No sé si seré capaz de hacerlo.

Primero quiero hablar de la situación actual, de lo que sabemos en física ahora mismo. Alguien puede pensar que ya lo he explicado todo, puesto que he hablado de todos los grandes principios conocidos. Pero los principios se refieren a *algo*; el principio de conservación de la energía se refiere a la energía de *algo*, y las leyes de la mecánica cuántica son leyes de la mecánica cuántica de *algo*. Ninguno de estos principios nos dice de qué parte de la naturaleza estamos hablando. Así pues, les voy a hablar un poco de aquello a lo que, se supone, se refieren todos estos principios.

En primer lugar existe la materia; y, curiosamente, toda la materia es de la misma clase. La materia de la que están hechas las estrellas es la misma que compone la Tierra. Las características de la luz emitida por las estrellas nos proporcionan una especie de huella

dactilar que nos permite saber que en ellas hay los mismos elementos químicos que en la Tierra. Los mismos átomos parecen estar presentes tanto en los seres vivos como en la materia inanimada: las ranas están hechas de la misma materia que las piedras, sólo que ordenada de forma distinta. Esto simplifica nuestro problema, ya que no tenemos más que átomos por todas partes.

Los átomos parecen estar hechos todos de la misma manera. Tienen un núcleo alrededor del cual hay electrones. Podemos confeccionar una lista de las partes del mundo que creemos conocer (figura 32).

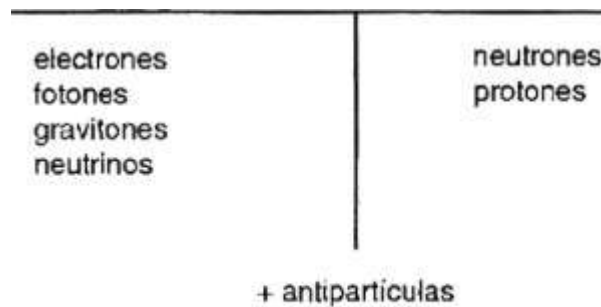


Figura 32

En primer lugar están los electrones, que son las partículas más externas del átomo. Luego están los núcleos, que hoy se consideran compuestos de otras dos cosas (dos tipos de partículas) llamadas neutrones y protones. Lo que vemos de las estrellas y sus átomos es la luz que emiten, y la propia luz se describe en términos de partículas llamadas fotones. Comenzamos hablando de la gravedad; si la teoría cuántica es correcta, la gravedad debería consistir en ondas que también se comportarían como partículas, los llamados

gravitones. Pero si prefieren no creer en ello pueden conformarse con hablar simplemente de gravedad. Por último mencioné también lo que se conoce como desintegración beta, en la que un neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un neutrino (en realidad, un antineutrino). Así que existe otra partícula, el neutrino. Además de todas estas partículas están, por supuesto, las antipartículas. Esto no es más que una forma expeditiva y sin complicaciones de duplicar el número de partículas.

Mediante las partículas citadas pueden explicarse todos los fenómenos de baja energía, de hecho todos los fenómenos comunes que, hasta donde sabemos, ocurren en cualquier parte del universo. Hay excepciones, como cuando alguna partícula de muy alta energía se deja caer de tarde en tarde, o se crea en el laboratorio. Pero si dejamos de lado estos casos especiales, todos los fenómenos corrientes pueden explicarse por las acciones y movimientos de las partículas. Por ejemplo, se supone que la propia vida es inteligible en principio a partir de los movimientos de los átomos, y estos átomos están hechos de neutrones, protones y electrones. Debo aclarar enseguida que cuando afirmamos que la vida es inteligible en principio sólo queremos decir que creemos que, si pudiéramos conocer todos los detalles, hallaríamos que no hay que descubrir nada nuevo en física para comprender el fenómeno de la vida. Otro ejemplo, el hecho de que las estrellas emitan energía, solar o estelar, seguramente es también comprensible en términos de reacciones nucleares entre estas partículas. Detalles de toda suerte sobre el comportamiento de los átomos quedan perfectamente descritos por

este tipo de modelo, al menos en la medida de nuestro conocimiento actual. De hecho, me atrevo a decir que en la actualidad no hay fenómeno que, a nuestro parecer, no pueda explicarse de esta manera, aunque sea demasiado misterioso.

Esto no siempre fue así. Un ejemplo es el fenómeno de la superconductividad, que significa que, a muy bajas temperaturas, los metales conducen la electricidad sin resistencia alguna. Al principio no era en absoluto obvio que fuera consecuencia de las leyes conocidas. Pero ahora que ha sido estudiado a fondo se ha visto que es perfectamente explicable en términos de nuestros conocimientos actuales. Existen otros fenómenos, como la telepatía, que no pueden ser explicados por la física que conocemos. Sin embargo, los fenómenos de este tipo no han sido debidamente verificados y no puede asegurarse que sean reales. Si fuera así, ello indicaría que la física es incompleta, y por eso es tan importante para los físicos saber si tales fenómenos son reales o no. Hay muchos experimentos que indican que no lo son. Lo mismo ocurre con las influencias astrológicas. Si fuera cierto que las estrellas pudieran influir en que un día fuera más adecuado que otro para visitar al dentista (en América tenemos este tipo de astrología), entonces habría que reconocer que la teoría física es incorrecta, porque en principio no existe mecanismo inteligible en términos del comportamiento de las partículas que pueda explicarlo. Es por esto por lo que los científicos se muestran escépticos hacia estas cosas. Por otra parte, en lo que respecta al hipnotismo, al principio, cuando el conocimiento del fenómeno era incompleto, parecía que

tampoco tenía explicación posible en el ámbito de la física. Sin embargo, ahora que se sabe más se reconoce que la hipnosis podría estar mediada por procesos fisiológicos normales, aunque todavía desconocidos. No parece, por lo tanto, que haga falta postular una fuerza especial nueva.

En la actualidad, aunque la teoría que explica lo que ocurre fuera del núcleo parece lo bastante precisa y completa, en el sentido de que si se dispone de tiempo suficiente es posible calcular cualquier cosa con tanta precisión como permitan las medidas, resulta que las fuerzas entre neutrones y protones, los constituyentes del núcleo, no se comprenden del todo bien. Con esto quiero decir que aunque dispusiéramos de tiempo suficiente y buenos ordenadores, nuestro desconocimiento parcial no nos permitiría calcular exactamente los niveles de energía del carbono, por ejemplo. No sabemos lo suficiente. Aunque podemos calcular los niveles de energía de los electrones que rodean el núcleo, no podemos calcular los del núcleo, porque nuestro conocimiento de las fuerzas nucleares es incompleto.

Con el fin de llenar esta laguna, se ha experimentado con fenómenos de muy alta energía. Por ejemplo, se hacen chocar neutrones y protones muy acelerados para obtener cosas poco comunes y, mediante el estudio de estas curiosidades, conseguir entender mejor las fuerzas entre neutrones y protones. [Pero estos experimentos han abierto la caja de Pandora] Aunque lo único que queríamos era comprender algo mejor las fuerzas entre neutrones y protones, cuando hacemos que estas partículas choquen con gran

fuerza descubrimos que existen más partículas en el mundo. De hecho, en nuestro intento de comprender las fuerzas nucleares hemos encontrado cerca de una cincuentena de otras partículas. Coloquemos estas otras partículas en la columna de neutrones y protones (figura 33), porque reaccionan con ellos y tienen que ver con las fuerzas que los unen.

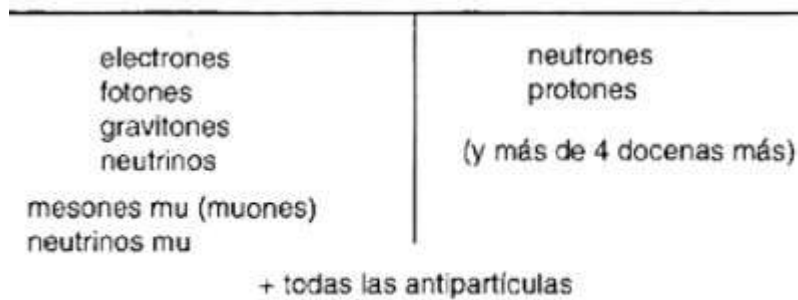


Figura 33

Por añadidura, mientras se iba excavando todo este cieno, se obtuvo un par de cosas irrelevantes para el problema de las fuerzas nucleares. Una de ellas es el denominado mesón mu o muón, y la otra su neutrino acompañante. Hay dos tipos de neutrino, el que acompaña al electrón y el que acompaña al muón. Dicho sea de paso, ya conocemos todas las leyes del muón y su neutrino, y estas leyes dicen, al menos hasta donde muestran los experimentos, que se comportan exactamente igual que el electrón y su neutrino, con la diferencia de que la masa del mesón es 207 veces mayor que la del electrón. Pero ésta es la única diferencia entre ambos objetos, lo cual no deja de ser asombroso. Cuatro docenas de partículas adicionales (más sus antipartículas) es una cantidad muy grande.

Tienen nombres diversos: mesones, piones, kaones, lambda, sigma... ¡Qué importa..., con cuatro docenas de partículas hace falta inventar un montón de nombres! Pero resulta que estas partículas se agrupan en familias, lo cual es un consuelo. En realidad, algunas de esas pretendidas partículas duran tan poco que se debate si realmente es posible definir su existencia, pero no voy a entrar en ello.

Para ilustrar la idea de que las partículas se presentan en familias, voy a considerar el caso del neutrón y el protón. Ambos tienen la misma masa, con una diferencia de milésimas. Sus masas respectivas son 1836 y 1839 veces la masa del electrón. Más notable es el hecho de que, en relación con las fuerzas nucleares, las fuerzas fuertes del interior del núcleo, la fuerza entre dos protones es la misma que entre un protón y un neutrón y que entre dos neutrones. En otras palabras, las interacciones nucleares fuertes no permiten distinguir un protón de un neutrón. Se trata, pues, de una ley de simetría: se pueden sustituir los protones por neutrones sin que nada cambie (si sólo importan las fuerzas nucleares). Claro que si sustituimos un protón por un neutrón introducimos una gran diferencia, puesto que el protón tiene carga eléctrica y el neutrón no. La medida de la carga eléctrica evidencia enseguida la diferencia entre neutrón y protón, de manera que la simetría anterior es lo que se denomina una simetría aproximada. Es cierta para las interacciones fuertes de las fuerzas nucleares, pero no es una simetría fundamental de la naturaleza, porque no se

cumple para la electricidad. Es, por lo tanto, una simetría parcial, de las que dan problemas a los físicos.

Ahora que se han ampliado las familias, resulta que las sustituciones del tipo neutrón por protón pueden hacerse extensivas a gran número de partículas. Pero la precisión es aún menor. La afirmación de que se pueden sustituir protones por neutrones es sólo aproximada (no es cierta en lo que respecta a la electricidad), pero las sustituciones adicionales descubiertas poseen un grado de simetría todavía menor. Sin embargo, estas simetrías parciales han permitido agrupar las partículas en familias y localizar huecos por llenar con partículas aún por descubrir.

Este juego de entrever relaciones de parentesco ilustra el tipo de precalentamiento que precede al descubrimiento de alguna ley profunda y fundamental. Una buena analogía es la confección por Mendeleev²⁰ de la tabla periódica de los elementos. Fue un primer paso, pero la descripción completa de la fundamentación de la tabla periódica fue mucho más tardía y llegó con la teoría atómica. De modo parecido, la organización de nuestro conocimiento de los niveles nucleares fue efectuada hace unos años por María Mayer y Jensen,²¹ en lo que denominaron el modelo de capas del núcleo.

La física participa de un juego similar, en el que se reducen las complejidades mediante la apreciación de relaciones aproximadas. Además de todas las partículas citadas tenemos todos los principios de los que hemos hablado (de simetría, de relatividad...) junto con la

²⁰ Dimitri Ivanovich Mendeleev, 1834-1907, químico ruso.

²¹ María Mayer, física norteamericana, premio Nobel en 1963. Profesora de Física en la Universidad de California desde 1960. Hans Daniel Jensen, físico alemán, premio Nobel en 1963. Director del Instituto de Física Teórica en Heidelberg desde 1949.

obligación de que las partículas se comporten según dicta la mecánica cuántica y, combinando esto con la relatividad, que todas las leyes de conservación sean locales.

Ahora bien, si juntamos todos estos principios constatamos que hay demasiados, que son mutuamente inconsistentes. Si tomamos la mecánica cuántica, más la relatividad, más la proposición de que todo tiene que ser local, más una serie de supuestos tácitos, da la impresión de que se tropieza con una inconsistencia, porque cuando calculamos ciertas cosas obtenemos un valor infinito; y si obtenemos un infinito, ¿cómo podremos decir que el resultado concuerda con la naturaleza? Un ejemplo de los supuestos tácitos que he mencionado, en relación con los cuales tenemos demasiados prejuicios para comprender su verdadera significación, es una proposición como la siguiente: si se calcula la probabilidad de todas las alternativas de un suceso (50 por ciento de posibilidades de que ocurra esto, 25 por ciento de que ocurra eso otro, etc.) su suma deberá ser igual a 1. Creemos que si sumamos todas las alternativas debemos obtener una probabilidad del 100 por ciento. No hay duda de que esta afirmación parece razonable, pero el problema siempre está en las cosas que parecen razonables. Otra proposición de este estilo es la que afirma que la energía debe ser siempre positiva. Otra proposición que seguramente contribuye a la inconsistencia es lo que se denomina causalidad, la idea de que los efectos no pueden preceder a sus causas. En realidad, nadie ha construido un modelo en el que se ignore la proposición relativa a las probabilidades, o se ignore la causalidad, y que a la vez sea

consistente con la mecánica cuántica, la relatividad, la localidad, etc. De manera que no sabemos cuál de nuestros supuestos es el que nos crea problemas con los infinitos. ¡Bonito problema! Sin embargo, resulta que es posible camuflar los infinitos mediante un truco algo burdo y continuar temporalmente con nuestros cálculos. Bien, ésta es la situación actual. Ahora les explicaré cómo buscar una nueva ley.

Por regla general, la búsqueda de nuevas leyes sigue los pasos que voy a describir. Primero la conjeturamos. A continuación calculamos las consecuencias de nuestra idea primitiva para ver cuáles serían las consecuencias de ser cierta nuestra conjetura. Comparamos luego los resultados de nuestros cálculos con lo que sabemos, por los experimentos o por la experiencia, acerca de la naturaleza para ver si cuadran. Si están en desacuerdo con los experimentos es que la conjetura está equivocada. En esta simple afirmación radica la clave de la ciencia. No importa que nuestra conjetura sea preciosa, ni lo listo que sea uno, ni el nombre del autor. Si los cálculos no concuerdan con lo observado la conjetura no vale. Y esto es todo. Es cierto que a todo ello hay que darle varias vueltas antes de emitir un veredicto definitivo, porque puede haber habido un error experimental, o algún detalle del experimento que haya pasado inadvertido, como un poco de suciedad, o que haya habido errores en el momento de transcribir los resultados. Todo esto es obvio, de manera que cuando hablo de que los cálculos no concuerdan con lo observado, se sobreentiende que el experimento y los propios cálculos han sido comprobados varias veces para

certificar que las consecuencias calculadas son las consecuencias lógicas de nuestra conjetura y que, en última instancia, están en desacuerdo con un experimento cuidadosamente verificado.

Lo que acabo de decir quizá les dé una impresión algo falsa de la ciencia, pues sugiere que se trata de hacer conjeturas que luego se comparan con experimentos, lo cual coloca el experimento en una posición subordinada. En realidad, los experimentadores tienen su propia personalidad. Les gusta experimentar aunque nadie haya conjeturado nada, y muy a menudo hacen experimentos en áreas aún no exploradas por los físicos teóricos. Por ejemplo, podemos conocer muchas leyes, pero no sabemos si son ciertas para altas energías. Los físicos experimentales han realizado ensayos en este campo y han obtenido algún que otro resultado problemático, por el cual algo que creíamos que era correcto resulta ser falso. Así pues, los experimentos pueden dar resultados insospechados que nos inciten a hacer nuevas conjeturas. Un ejemplo de resultado inesperado es el mesón mu y su neutrino, cuya existencia nadie había imaginado antes de su descubrimiento, y que continúan siendo un reto para los teóricos.

Ya se habrán dado cuenta de que por este método es posible intentar demostrar la falsedad de cualquier teoría. Si tenemos una teoría estructurada, una conjetura auténticamente científica, a partir de la cual puedan calcularse consecuencias que puedan contrastarse experimentalmente, es posible en principio acabar con ella. Existe siempre la posibilidad de demostrar la falsedad de una teoría bien formulada; pero observen que nunca podemos demostrar

su verdad. Supongamos que tienen ustedes una idea brillante, calculan las consecuencias y descubren una y otra vez que las consecuencias calculadas concuerdan con los experimentos. ¿Puede decirse que la teoría es verdadera? No, simplemente no se ha demostrado que sea falsa. En el futuro podrían calcularse nuevas consecuencias que condujeran a nuevos experimentos que podrían invalidar la teoría. Es por esto por lo que leyes como las de Newton sobre el movimiento de los planetas han perdurado durante tanto tiempo. Newton inventó la ley de la gravedad, calculó todo tipo de consecuencias, las comparó con lo observado experimentalmente... y tuvieron que pasar varios siglos antes de que alguien observara un ligero error en el movimiento de Mercurio. Durante todo ese tiempo no se había demostrado que la teoría fuera falsa y, por lo tanto, podía considerarse provisionalmente cierta. Pero nunca podía probarse que fuera cierta, porque al día siguiente un experimento podía demostrar que lo que creíamos cierto era falso. Nunca estamos definitivamente en lo cierto; de lo único que podemos estar seguros es de estar equivocados. Sin embargo, no deja de ser alentador que podamos tener ideas que duren tanto tiempo.

Una manera de acabar con la ciencia sería experimentar únicamente en las áreas donde se aplican las leyes. Por suerte, los físicos experimentales trabajan de forma muy diligente y sin regatear esfuerzos precisamente en aquellas zonas en las que parece más probable que puedan invalidar nuestras teorías. En otras palabras, estamos intentando demostrar nuestras equivocaciones lo más rápidamente posible, porque sólo de esta manera se puede

avanzar. Por ejemplo, entre los fenómenos de baja energía corrientes no sabemos dónde buscarnos problemas, todo nos parece bien y, por ello, no existe ningún programa de investigación espectacular que busque problemas en las reacciones nucleares o en la superconductividad. En estas conferencias he tratado del descubrimiento de leyes fundamentales. Igualmente interesante, a otro nivel, es intentar comprender fenómenos tales como la superconductividad o las reacciones nucleares en términos de las leyes fundamentales. Pero ahora me estoy refiriendo a buscar problemas, a buscar errores en las leyes fundamentales; y puesto que entre los fenómenos de baja energía nadie sabe dónde buscarlos, todos los experimentos actuales con vistas a encontrar nuevas leyes se hacen en el campo de las altas energías.

Otra cosa que quiero destacar es que es imposible demostrar que una teoría vaga esté equivocada. Si la conjetura que se hace es imprecisa y el método usado para extraer consecuencias es más bien vago (uno dice: «Me parece que esto se puede explicar por eso y aquello, y de esto se sigue más o menos aquello, de manera que podemos considerar que la cosa funciona más o menos así...») entonces seguro que la teoría es buena, ¡porque no se puede demostrar que esté equivocada! Si encima el cálculo de las consecuencias no está bien definido, es fácil, con un poco de habilidad, convertir cualquier resultado experimental en una confirmación. Seguramente ustedes estarán acostumbrados a este modo de proceder en otras disciplinas. El señor A odia a su madre, y la razón obvia es que de niño su madre no lo acariciaba ni era lo

bastante afectuosa con él. Pero investigando se descubre que de hecho su madre lo quería mucho y todo iba de maravilla; muy bien, ¡entonces es que lo mimaba demasiado! La ventaja de tener una teoría vaga es que admite cualquier resultado. La cura de este mal es la siguiente. Si fuera posible expresar exactamente y por anticipado qué se entiende por suficiente amor y cuándo éste pasa a ser excesivo, existiría una teoría perfectamente legítima que podría someterse a verificación. A esto se suele responder: «Cuando estamos tratando de cuestiones psicológicas no es posible definir las cosas con tanta precisión». Es cierto, pero entonces nunca se podrá afirmar que se sabe algo del tema.

Quizá les horrorice saber que en física también hay ejemplos de esto. Las simetrías aproximadas de las que he hablado funcionan así. Tenemos una simetría aproximada y, bajo el supuesto de que es perfecta, calculamos una serie de consecuencias. Al compararlas con los experimentos, se ve que las cosas no cuadran. Naturalmente: dado que la simetría es aproximada, si las observaciones se acercan a las previsiones decimos, «¡Espléndido!», y si no, «En fin, debe de ser algo especialmente sensible a la falta de simetría». Ustedes se reirán, pero es la única forma de avanzar. Cuando nos encontramos ante algo nuevo, como todas esas partículas extrañas, esta forma de maniobrar, de ir tanteando el terreno, es la forma de empezar a hacer ciencia. Lo mismo que he dicho de la psicología es aplicable a las proposiciones de simetría de la física, así que no se rían tanto. Al principio es necesario andarse con sumo cuidado, porque es muy fácil sucumbir a esta teorización

vaga cuyos errores son tan difíciles de demostrar, y se requiere cierta habilidad y experiencia para no caer en la trampa.

En este proceso de hacer conjeturas, calcular sus consecuencias y contrastarlas con el experimento, podemos quedarnos clavados en alguna de las etapas. Nos podemos quedar atascados por falta de ideas, o al hacer los cálculos. Por ejemplo, en 1934 Yukawa²² concibió una teoría de las fuerzas nucleares, pero nadie fue capaz de calcular sus consecuencias, porque las matemáticas requeridas eran demasiado difíciles, por lo que la idea no pudo contrastarse experimentalmente. Su teoría se sostuvo durante mucho tiempo, hasta que se descubrieron partículas no contempladas por Yukawa, lo que hace pensar que las cosas no son tan simples como él imaginó. También podemos quedarnos atascados en la vía experimental. Por ejemplo, la teoría cuántica de la gravedad avanza muy despacio, si es que lo hace, porque en los experimentos factibles nunca intervienen la mecánica cuántica y la gravedad al mismo tiempo. La fuerza de la gravedad es demasiado débil en comparación con la fuerza eléctrica.

Como yo soy un físico teórico y disfruto más con este aspecto de la cuestión, quiero concentrarme ahora en cómo nacen las conjeturas. Como ya he dicho, carece de toda importancia la procedencia de la idea; sólo importa que esté de acuerdo con los experimentos y que sea lo más precisa posible. Alguien dirá: «Bueno, esto es muy fácil; no hay más que echar mano de un gran ordenador con una ruleta que genere aleatoriamente una serie de conjeturas, que calcule

²² Hideki Yukawa, físico japonés. Director del Instituto de Investigación de Física Fundamental de Kyoto. Premio Nobel en 1949.

inmediatamente las consecuencias de la hipótesis de turno, y que las compare con una lista de resultados experimentales almacenados en la memoria del ordenador». En otras palabras, hacer conjeturas sobre la naturaleza es cosa de tontos. La realidad, sin embargo, es muy otra. Intentaré explicar por qué.

El primer problema es el punto de partida. Ustedes pensarán: «Bueno, habrá que partir de los principios conocidos». Ahora bien, los principios conocidos son mutuamente inconsistentes, así que hay que eliminar alguno. Estamos cansados de recibir cartas de gente que insiste en prescindir de algún supuesto fundamental. Unos dicen: «Ustedes siempre suponen que el espacio es continuo, pero a una escala muy, muy pequeña el espacio podría consistir en puntos separados». Otros dicen: «Sabe, esas amplitudes de probabilidad de la mecánica cuántica son algo tan complicado y absurdo que no entiendo qué le hace creer que sean correctas; ¿y si no lo fueran?». Estas observaciones son obvias y están claras para cualquiera que trabaje en este tipo de problemas. No se gana nada insistiendo en ellas. El problema no es señalar lo que puede estar mal, sino proponer algo que pueda ocupar su lugar. En el caso del espacio, consideremos la alternativa de que el espacio consiste en una serie de puntos, que el vacío entre puntos no significa nada, y que los puntos se distribuyen en una trama cúbica. Pues bien, es fácil demostrar que esta conjetura es falsa, porque no funciona. La cuestión no es sugerir que algo puede estar equivocado, sino idear una alternativa válida, lo cual no es tan sencillo. Tan pronto como

una idea bien definida es reemplazada por otra, casi inmediatamente se comprueba que la alternativa es falsa.

La segunda dificultad radica en que existe un número infinito de posibilidades simples como las descritas. Es como si uno hubiera estado trabajando durante mucho tiempo intentando abrir una caja fuerte, y de pronto apareciera Pepe, que no sabe nada de lo que hago excepto que intento abrir una caja fuerte, y dijera: «¿Por qué no pruebas la combinación 10-20-30?». Pues porque estoy muy atareado y porque ya he probado multitud de cosas, quizás incluso la combinación 10-20-30. Puede que hasta sepa que el número de en medio es 32 y no 20, y hasta puede que sepa que la combinación es de cinco cifras y no de tres. De manera que, por favor, no me manden más cartas diciéndome lo que tengo que hacer. Leo las cartas (siempre lo hago por si acaso me sugirieran algo en lo que no había pensado), pero lleva demasiado tiempo contestarlas, porque casi siempre son del tipo «pruebe con 10-20-30». Como de costumbre, la imaginación de la naturaleza supera con mucho la nuestra, como nos demuestra la profundidad y sutileza de las teorías físicas. Concebir una hipótesis profunda y sutil no es fácil; hay que ser muy listo, y no es posible encomendarle este trabajo a una máquina.

Ahora quiero hablar del arte de adivinar las leyes de la naturaleza, porque ciertamente es un arte. ¿Cómo se hace? Podemos echar una mirada al pasado para ver cómo lo hicieron otros. Veamos qué nos enseña la historia.

Debemos empezar con Newton. Ante un conocimiento incompleto, Newton fue capaz de entrever las leyes reuniendo ideas muy ligadas todas ellas a hechos experimentales, de manera que la distancia entre la observación y la verificación era pequeña. Esta fue una primera vía que en la actualidad ya no funciona tan bien.

El siguiente en hacer algo grande fue Maxwell, quien dedujo las leyes de la electricidad y el magnetismo. Lo que hizo fue juntar las leyes de la electricidad debidas a Faraday y predecesores, las estudió y vio que eran matemáticamente inconsistentes. Para arreglar esto faltaba añadir un término a una ecuación. Maxwell se inspiró en un modelo de cojinetes y ruedas en el espacio ideado por él mismo. Hoy no tenemos ninguna fe en el mecanismo de Maxwell, pero las ecuaciones que obtuvo son correctas. De manera que la lógica puede estar equivocada y, sin embargo, los resultados pueden ser válidos.

En el caso de la relatividad, el proceso de descubrimiento fue totalmente distinto. Las leyes conocidas daban resultados inconsistentes, lo que había conducido a una acumulación de paradojas. En este caso lo novedoso fue la manera de pensar, en términos de las posibles simetrías de las leyes. Fue algo especialmente difícil, porque por vez primera nos dimos cuenta de que algo como las leyes de Newton podía parecer cierto durante mucho tiempo y, a pesar de ello, resultar falso en última instancia. También resultó difícil de aceptar que las ideas corrientes sobre el espacio y el tiempo, que parecían tan intuitivas, estuvieran equivocadas.

La mecánica cuántica fue descubierta por dos caminos independientes, lo cual es muy aleccionador. También en este caso, incluso en mayor medida, se fue acumulando un número enorme de paradojas experimentales, cosas que de ninguna forma podían explicarse a partir de lo que ya se sabía. No es que nuestro conocimiento fuera incompleto, sino que era demasiado completo. Se predecía que iba a ocurrir tal cosa... y no ocurría. Un camino fue abierto por Schrödinger,²³ quien concibió la ecuación, y el otro por Heisenberg, quien argumentó que había que analizar lo que se podía medir. Dos métodos filosóficos tan distintos acabaron conduciendo al mismo descubrimiento.

Más recientemente, el descubrimiento de la ya citada ley de la desintegración débil (cuando un neutrón se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino) viene a representar una situación distinta. En esta ocasión sólo se descubrió la ecuación, por lo que éste es un caso de conocimiento incompleto. La dificultad que tuvo que superarse en este caso era que todos los resultados experimentales eran erróneos. ¿Cómo puede darse con la teoría buena si, cuando se calcula el resultado, éste no concuerda con los experimentos? Hay que tener mucha valentía para insistir en que los experimentos deben estar mal. Más adelante explicaré de dónde procede esta valentía.

Actualmente no tenemos paradojas (quizá). Tenemos infinitos que aparecen cuando juntamos todas las leyes, pero la gente que se ocupa de esconderlos bajo la alfombra es tan lista que uno acaba

²³ Erwin Schrödinger, físico teórico austriaco. Ganó el premio Nobel de física en 1933 junto con Paul Dirac.

pensando que no se trata de una paradoja seria. Una vez más, el descubrimiento de todas esas partículas nos dice que nuestro conocimiento es incompleto. Estoy convencido de que en física la historia nunca se repite, como se desprende de los ejemplos que he puesto. La razón es que los procedimientos al uso (como «piensa en las simetrías» o «expresa la información matemáticamente» o «inventa ecuaciones») son patrimonio de todos y se aplican continuamente. Si nos encallamos, seguro que la solución no estará en ninguno de estos trucos, porque son los primeros que se intentan. La próxima vez será de otra manera. Cuando nos encontramos en un atolladero de problemas y complicaciones se debe a que los métodos que estamos usando han quedado obsoletos. El método que conducirá a un nuevo descubrimiento será algo completamente distinto. Con lo cual concluimos que la historia no va a resultarnos de mucha ayuda.

Quisiera decir algo sobre la idea de Heisenberg de que es mejor no hablar de lo que no puede medirse, porque mucha gente se refiere a esta idea sin comprenderla realmente. Puede interpretarse en el sentido de que los modelos o inventos que uno conciba deberán ser tales que sus consecuencias calculadas sean contrastables experimentalmente (nada del estilo de «un muu debe ser igual a tres guus», cuando nadie sabe qué es un muu o un guu). Esto es obvio. Pero si las consecuencias pueden contrastarse con algún experimento, con esto basta. No importa que en la hipótesis haya muus y guus. Uno puede incluir tantas barbaridades como quiera en una hipótesis, siempre que las consecuencias sean contrastables

experimentalmente. Esto no siempre se entiende como debiera. La gente se queja a menudo de la extensión al reino atómico de ideas como la de partícula, trayectoria, etc., sin las debidas garantías. Sin razón, puesto que no hay nada arbitrario en esta extensión. Debemos, y así lo hacemos, ir más allá de lo que ya sabemos, más allá de las ideas establecidas. ¿Peligroso? Sí. ¿Incierto? Sí. Pero es la única forma de progresar. Aunque el camino sea incierto, es necesario que la ciencia sea útil, y para serlo tiene que hablar de experimentos no realizados con anterioridad; no puede servir sólo para hablar de lo que ya está hecho.

Hay que extender las ideas más allá de lo ya verificado. Por ejemplo, la ley de la gravedad, que se desarrolló para comprender el movimiento de los planetas, no hubiese servido de nada si Newton hubiera pensado simplemente: «Ahora ya entiendo el movimiento de los planetas», y no hubiese intentado comparar éste con la atracción que ejerce la Tierra sobre la Luna, y si otros después que él no hubieran pensado que quizá lo que mantiene unidas las galaxias es la gravedad. Esto es lo que hay que intentar. Alguien podría decir: «Cuando se llega tan lejos como las galaxias, como no sabemos nada de ellas, todo es posible».

De acuerdo. Pero la ciencia no se construye aceptando este tipo de limitaciones. No tenemos una comprensión total de las galaxias, pero asumir que la totalidad de su comportamiento se explica mediante leyes conocidas es un supuesto limitado y perfectamente definido que puede ser desenmascarado fácilmente por la

experiencia. El caso es que, de momento, el comportamiento de las galaxias no parece desmentir esta proposición.

Puedo darles otro ejemplo aún más interesante y crucial. Seguramente el supuesto que más poderosamente ha contribuido al progreso de la biología es el de que todo lo que hacen los seres vivos lo pueden hacer los átomos; que los fenómenos observados en el mundo de la biología son el resultado de fenómenos físicos y químicos, sin «extra» de ningún tipo. Uno siempre podrá decir que «cuando se trata de seres vivos todo es posible» si se conforma con no entender nunca los seres vivos. Es muy difícil creer que los movimientos de los tentáculos de los pulpos son sólo vagabundeos de los átomos según leyes físicas conocidas. Pero, cuando se investiga bajo esta hipótesis, se pueden hacer conjeturas muy precisas sobre su funcionamiento. De esta manera nuestra comprensión avanza, y mucho. De momento aún no se ha cortado el tentáculo (no se ha demostrado que este supuesto sea falso).

No es poco científico hacer conjeturas, aunque mucha gente alejada de la ciencia pueda pensar lo contrario. Hace algunos años tuve una conversación sobre platillos volantes con un profano (¡como soy un científico, debo saberlo todo sobre platillos volantes!). Le dije que no creía que existieran, a lo que mi interlocutor respondió: «¿Es imposible que existan platillos volantes?». «No», dije, «no puedo demostrar que sea imposible; es sólo muy poco probable», a lo que él replicó: «Qué poco científico es usted; si no puede demostrar que es imposible, ¿cómo se atreve a decir que es poco probable?». Pero éste es el modo de ser científico. Es científico limitarse a decir que

algo es probable o improbable, y no ir por ahí demostrando lo que es posible o imposible. Para precisar lo que quiero decir, podría haberle contestado: «Mire, lo que quiero decir es que, a partir de mi conocimiento del mundo que me rodea, creo que es mucho más probable que las informaciones sobre platillos volantes sean un producto de características irracionales conocidas de la inteligencia terrestre que del esfuerzo racional de alguna inteligencia extra-terrestre». Simplemente, es más probable; eso es todo. Es una buena conjetura. Siempre intentamos imaginar la explicación más probable, teniendo siempre presente que, si no funciona, tendremos que considerar otras posibilidades.

¿Cómo decidir con qué quedarse y qué desechar? Tenemos toda esa espléndida retahíla de principios y hechos conocidos, pero nos encontramos con el problema de que o nos resignamos a caer en los infinitos o tenemos que admitir que nos falta algo. A veces esto significa tener que prescindir de alguna idea. Al menos en el pasado siempre hemos tenido que desechar alguna idea de la que estábamos profundamente convencidos. La cuestión es qué hay que descartar y qué conviene conservar. Si se prescinde de todo seguramente habremos ido demasiado lejos y nos quedaremos sin nada con que trabajar. Después de todo, la conservación de la energía tiene buen aspecto y no quiero prescindir de ella. Decidir con qué quedarse requiere una habilidad considerable. En realidad, probablemente no es más que una cuestión de suerte, pero parece que se necesite una gran habilidad.

Las amplitudes de probabilidad son cosas muy raras, y lo primero que a uno se le ocurre es que las ideas nuevas y un poco raras son claramente sospechosas. Sin embargo, y por raro que parezca, todo lo que se deduce a partir de las amplitudes de probabilidad mecanocuánticas funciona en un cien por cien para toda la larga lista de partículas extrañas. Por ello soy de los que creen que el día que descubramos el entramado del mundo estas ideas seguirán siendo válidas. Creo que toda esta parte es correcta, pero esto es sólo una hipótesis; les estoy contando mi forma de especular.

Por el contrario, creo que la teoría de que el espacio es continuo es incorrecta, porque surgen esos infinitos junto con otras dificultades, y no acabamos de poner en claro qué determina el tamaño de las partículas. Tengo la sospecha de que las ideas simples de la geometría dejan de tener validez cuando se llevan hasta un espacio infinitamente pequeño. En este caso, evidentemente, sólo estoy creando un vacío y no estoy ofreciendo ninguna alternativa. Si lo hiciera, acabaría esta conferencia con una nueva ley.

Algunos se han basado en la inconsistencia de los principios de la física para afirmar que sólo hay un mundo consistente posible, que si juntamos todos los principios y calculamos con la máxima precisión no solamente podremos deducir los principios básicos, sino que además veremos que éstos son los únicos compatibles con la consistencia. A mí esto me parece demasiado. Yo creo que hay que aceptar la existencia de ciertas cosas (no la cincuentena de partículas, pero sí algunas cositas como los electrones, etc.) y esto, junto con todos los principios, seguramente da lugar a todas las

grandes complejidades observadas. No creo que podamos obtenerlo todo a partir de argumentos sobre consistencias.

Otro problema con el que nos enfrentamos es el de las simetrías parciales. Estas simetrías, como la afirmación de que los neutrones y protones son casi lo mismo aunque distintos desde el punto de vista eléctrico, o el hecho de que la simetría por reflexión se cumpla excepto en un tipo particular de reacción, son verdaderamente molestas. No hay simetría perfecta por muy poco. En relación con esto hay dos escuelas de pensamiento. Una afirma que todo es realmente muy simple, que se trata efectivamente de simetrías, pero que por alguna pequeña complicación se produce un mínimo desbarajuste; y luego hay otra escuela, cuyo único representante soy yo, que dice que no, que puede tratarse de algo realmente complicado y que sólo resolviendo las complicaciones se llegará a una formulación simple. Los griegos creían que las órbitas de los planetas eran circunferencias. En realidad son elipses. No son completamente simétricas, pero se acercan mucho a la circunferencia. La cuestión es: ¿por qué son tan parecidas a circunferencias? ¿Por qué son casi simétricas? Debido a un largo y complicado efecto de fricción (una idea muy complicada). Es posible que, en el fondo de su corazón, la naturaleza sea completamente asimétrica en estas cosas, pero entre las complejidades de la realidad nos acaba pareciendo casi simétrica, y las elipses parecen casi circunferencias. Ésta es otra posibilidad; pero nadie lo sabe, es pura especulación.

Supóngase que tenemos dos teorías, A y B, que psicológicamente parecen muy distintas y se basan en ideas distintas, pero tales que todas sus consecuencias son exactamente idénticas y todas se confirman experimentalmente.

Ambas teorías, aunque en principio parezcan distintas, tienen las mismas consecuencias, lo que normalmente es fácil de verificar matemáticamente. Supongamos, pues, que tenemos dos teorías válidas. ¿Cómo vamos a decidir con cuál quedarnos? Científicamente no es posible, puesto que ambas tienen el mismo grado de confirmación experimental. De manera que dos teorías, aunque puedan originarse en ideas profundamente distintas, pueden ser matemáticamente idénticas y no haber forma científica de distinguirlas.

Sin embargo, por razones psicológicas, con vistas a idear nuevas teorías, ambas teorías pueden ser muy diferentes. Al situar una teoría en un marco determinado se adquiere cierta idea de lo que hay que cambiar. Existirá algo en la teoría A, por ejemplo, que se refiera a una cosa determinada y que nos hará decir: «Voy a cambiar esta idea». Pero puede resultar muy complicado hallar en la teoría B el equivalente exacto de lo que quiero cambiar. En otras palabras, aunque las teorías sean equivalentes antes de modificarlas, hay maneras de cambiar una teoría que resultan naturales en una pero no necesariamente en la otra. Por ello, desde el punto de vista psicológico, conviene tener siempre presentes todas las teorías y, por ello, cualquier físico teórico que se precie conoce seis o siete representaciones teóricas distintas de una misma cuestión. Sabe

que todas son equivalentes y que, a este nivel, nadie será nunca capaz de decidir si una es mejor que otra, pero las tiene presentes con la esperanza de que le proporcionarán ideas distintas.

Esto me recuerda otro tema, y es que la filosofía de una teoría o las ideas en torno suyo pueden cambiar mucho aunque los desajustes que haya que arreglar sean mínimos. Por ejemplo, las ideas de Newton sobre el espacio y el tiempo tenían una confirmación experimental excelente, pero para corregir el pequeñísimo error en la órbita de Mercurio hizo falta una teoría de carácter enormemente diferente. Fue la propia simplicidad y perfección de las leyes de Newton y su ajuste tan preciso a la experiencia lo que hizo que, para conseguir un resultado un poco distinto, se necesitara un cambio enorme. Al proponer una nueva ley no se pueden introducir imperfecciones en una cosa perfecta; hay que lograr otra cosa aún más perfecta. Es por esto por lo que las diferencias filosóficas entre las teorías de la gravedad de Newton y de Einstein son tan enormes. ¿Qué filosofías son éstas? En realidad no son más que pequeños trucos para calcular consecuencias rápidamente. Una filosofía o, como a veces se dice, una interpretación de la ley es simplemente una manera de tener las leyes en la cabeza para deducir consecuencias de manera rápida. Hay quien ha dicho, y esto es cierto en casos como el de las ecuaciones de Maxwell: «Olvidémonos de la filosofía y de cualquier cosa que se le parezca. Dedicuémonos sólo a formular ecuaciones. El único problema es el de calcular las respuestas de forma que concuerden con los experimentos, y para ello no hace ninguna falta una filosofía o argumento o explicación

verbal de las ecuaciones». Es un buen consejo si lo único que pretendemos es resolver la ecuación, pues así estaremos libres de prejuicios que puedan entorpecer nuestra búsqueda de soluciones. Pero, por otra parte, quizá la filosofía nos ayude a pensar. Es difícil de decir.

A quienes insisten en que lo único importante es que la teoría concuerde con los experimentos les pediría que imaginen una discusión entre un astrónomo maya y su discípulo. Los mayas eran capaces de predecir con gran precisión los eclipses, la posición de la Luna en el cielo, la posición de Venus, etc. Lo hacían todo a base de aritmética. Contaban, sumaban, restaban, etc. No se discutía qué cosa era la Luna. No se discutía ni siquiera la idea de que la Luna girara. Simplemente calculaban la fecha del eclipse o de la luna llena. Imaginemos que un joven estudiante le dijera al astrónomo: «Tengo una idea: quizás estas cosas que vemos estén girando y sean globos hechos de piedras parecidas a las que vemos a nuestro alrededor y podamos calcular su movimiento y no sólo el momento de su aparición en el cielo». «Sí», contesta el astrónomo, «¿pero con qué precisión puedes predecir un eclipse?». El joven responde: «Bueno, todavía no he desarrollado demasiado mi idea». A lo que el astrónomo contesta: «Mira, nosotros podemos calcular los eclipses con más precisión que tú con tu modelo, de manera que es mejor que te olvides de tu idea porque la formulación matemática es obviamente mejor». Cuando surge alguien con una idea nueva y dice: «Supongamos que el mundo es de otra manera», hay una marcada tendencia a contestarle: «¿Qué respuesta obtiene usted en

tal y cual problema?». La respuesta suele ser: «Aún me falta desarrollarlo un poco», y la contestación: «Mira, nosotros lo hemos desarrollado mucho más y obtenemos respuestas mucho más precisas». De todo esto se deduce que el dilema entre preocuparse o no por la filosofía que subyace tras las teorías es importante.

Otra manera de trabajar, obviamente, es conjeturar nuevos principios. En su teoría de la gravitación, Einstein concibió el principio correspondiente a la idea de que las fuerzas son siempre proporcionales a las masas. La idea es que si estamos en un coche que está acelerando es imposible distinguir esta situación de la de estar en un campo gravitatorio. Añadiendo este principio a los demás fue capaz de deducir las leyes correctas de la gravitación.

Hemos visto unas cuantas maneras de concebir hipótesis. Ahora me gustaría discutir algunas cuestiones relativas al resultado final. Antes que nada, cuando ya hemos terminado y tenemos una teoría matemática a partir de la cual pueden calcularse consecuencias, ¿qué hacemos después? La cosa es realmente asombrosa. Para saber cómo va a comportarse un átomo en determinadas circunstancias, componemos una serie de reglas mediante marcas en un papel, metemos esto en una máquina con interruptores que se abren y cierran según un procedimiento complicado, ¡y el resultado nos dice lo que va a hacer el átomo!

Si la forma de abrirse y cerrarse de estos interruptores fuera algún tipo de modelo del átomo, si pensáramos que el átomo contiene interruptores, quizá diría que he entendido más o menos lo que ocurre. A mí me asombra que sea posible hacer predicciones

mediante cálculos matemáticos, sin más que seguir unas reglas que de hecho no tienen nada que ver con la cosa en cuestión. Las aberturas y cierres de los interruptores en un ordenador son algo muy distinto de lo que ocurre en la naturaleza.

Una de las cuestiones más importantes en el asunto de «imaginar - calcular consecuencias - comparar con experimentos» es saber cuándo está uno en lo cierto. Es posible saber que se ha acertado mucho antes de verificar todas las consecuencias. Es posible reconocer la verdad por su belleza y simplicidad. Siempre es fácil, cuando se ha hecho una conjetura y realizado dos o tres cálculos para cerciorarse de que la cosa no es descabellada, saber que hemos dado en el clavo. Si esto resulta tan claro (siempre que se tenga algo de experiencia) es porque lo que suele ocurrir es que sale más de lo que entra. De hecho, la hipótesis que se hace es que algo es muy simple. Si no se ve enseguida que algo anda mal, y la alternativa es más simple que lo que había antes, entonces hemos acertado. Los chiflados, los iluminados y gente así hacen conjeturas simples, pero enseguida se ve que están equivocados. Otros, los estudiantes inexpertos, hacen hipótesis muy complicadas, y parece como si todo estuviera bien, pero se sabe que están equivocados porque la verdad resulta ser siempre más simple de lo esperado. Lo que necesitamos es imaginación, pero imaginación encorsetada en una terrible camisa de fuerza. Tenemos que encontrar una nueva visión del mundo que coincida con todo lo que se sabe, pero que en algún aspecto haga previsiones distintas, de otro modo carecerá de interés. En estas previsiones tiene que coincidir con la naturaleza.

Si ustedes construyen una nueva visión del mundo que coincida con la totalidad de las cosas ya observadas, pero que se distinga en algo aún por observar, habrán hecho un gran descubrimiento. Es casi imposible, aunque no del todo, dar con una teoría que concuerde con todos los experimentos que han servido para contrastar las demás teorías y tenga consecuencias distintas en otras cuestiones, incluso si estas consecuencias distintas resultan no concordar con la naturaleza. Concebir una idea nueva es muy difícil. Hace falta una imaginación fantástica.

¿Cuál es el futuro de esta aventura? ¿Qué ocurrirá en última instancia? Es seguro que vamos a continuar descubriendo leyes. ¿Cuántas leyes habrá que descubrir? No lo sé. Algunos colegas dicen que este aspecto fundamental de nuestra ciencia continuará, pero yo estoy convencido de que no surgirán novedades de manera perpetua, digamos durante mil años. No puede ser que esto siga así y vayamos descubriendo cada vez más leyes nuevas. De ser así, acabará resultando aburrido descubrir que hay tantos niveles uno debajo del otro. A mí me parece que lo que va a ocurrir en el futuro es que o bien acabaremos conociendo todas las leyes (es decir, que tendremos suficientes leyes para que las consecuencias calculadas concuerden siempre con los experimentos, lo que será el fin) o bien los experimentos se irán haciendo cada vez más difíciles y caros, de manera que comprenderemos el 99,9 por ciento de los fenómenos, pero siempre surgirá algo que será muy difícil de medir y no concordará con lo anterior, y tan pronto se obtenga la explicación de este hecho surgirá otro más, y el proceso irá haciéndose cada vez

más lento y menos interesante. Ésta es otra manera de acabar. Pero, en cualquier caso, pienso que se acabará de una u otra manera.

Tenemos suerte de vivir en una época en la que todavía se hacen descubrimientos. Es como el descubrimiento de América: sólo se descubre una vez. La época que nos ha tocado vivir es la época en la que se están descubriendo las leyes de la naturaleza, y no volverá a repetirse. Es muy estimulante, es una maravilla, pero esto pasará. Claro que en el futuro habrá otros intereses. Persistirá el interés por conectar un nivel de fenómenos con otro (los fenómenos biológicos, por ejemplo) o, si hablamos de explorar, por la exploración de otros planetas, pero no se hará lo mismo que estamos haciendo ahora.

Otra cosa que ocurrirá es que, en última instancia, si al final lo sabemos todo o empezamos a aburrirnos, el rigor filosófico y la precaución de los que he hablado irán desapareciendo gradualmente. Los filósofos que están siempre haciendo comentarios estúpidos desde fuera conseguirán meterse dentro. No podremos rechazarlos diciendo que si estuvieran en lo cierto podríamos conocer el resto de las leyes, porque cuando tengamos todas las leyes habrán encontrado una explicación para ellas. Por ejemplo, siempre hay explicaciones de por qué el mundo es tridimensional. Bueno, pues como sólo hay un mundo y es difícil decidir si una determinada explicación es correcta o no, si se conociese todo habría alguna explicación de por qué las leyes conocidas son las correctas. Esta explicación no sería ya criticable sobre la base de que este tipo de argumento no nos permitirá

avanzar más. Habrá, pues, una degeneración de las ideas, como la degeneración de un territorio que empieza a ser invadido por los turistas que suceden a los grandes exploradores.

En nuestra época la gente está gozando sobremanera, con el gozo que se siente cuando se está descubriendo cómo funciona la naturaleza en una situación nunca contemplada con anterioridad. Mediante la investigación y la experimentación en un campo concreto puede adivinarse lo que puede ocurrir en una región nunca explorada por nadie. Es un poco distinto de una exploración geográfica, porque hay suficientes pistas en las zonas descubiertas para imaginar cómo será el territorio por descubrir. Entre paréntesis, estas hipótesis acostumbran a ser muy distintas de lo ya visto, por lo que requieren un gran esfuerzo mental.

¿Qué tiene la naturaleza que permite que ocurra esto, que sea posible imaginar, a partir de un fragmento, lo que hará el resto? Esta no es una pregunta científica: no sé qué respuesta darle y, en consecuencia, voy a contestar de forma no científica. Creo que se debe a que la naturaleza es simple y, por eso mismo, de una gran belleza.