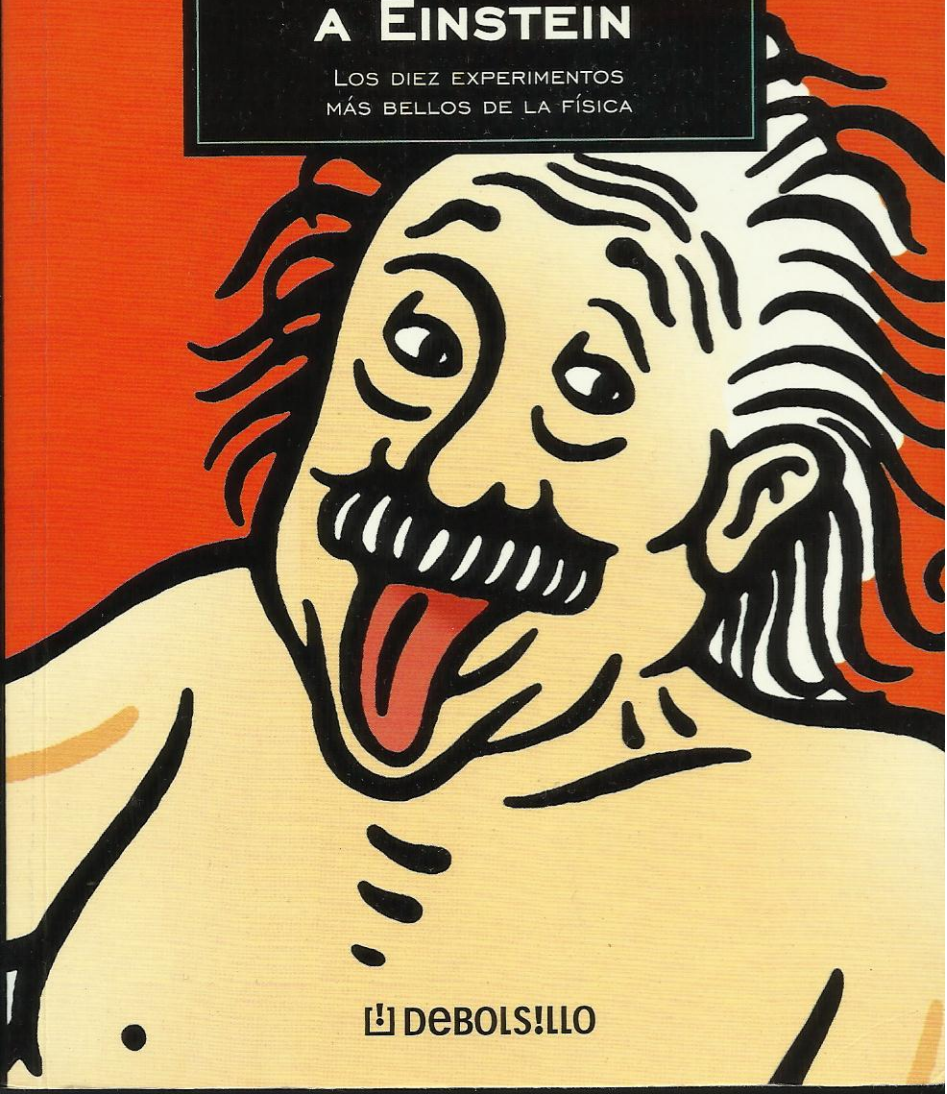


CIENCIA

MANUEL LOZANO LEYVA

DE ARQUÍMEDES A EINSTEIN

LOS DIEZ EXPERIMENTOS
MÁS BELLOS DE LA FÍSICA



 DEBOLS!LLO

En el año 2002, se realizó una encuesta entre más de doscientos reputados especialistas mundiales acerca de los experimentos que, con menos medios materiales, han conseguido unir belleza e inteligencia. El resultado de aquel trabajo es este libro del profesor Lozano Leyva, uno de los físicos españoles más brillantes, que recoge, analiza e interpreta cronológicamente las diez experiencias mejor valoradas y más votadas por la comunidad científica internacional.

Pensado para el gran público y gracias a la capacidad de divulgación y síntesis del profesor Lozano Leyva, cualquier lector podrá disfrutar con la desbordante imaginación de los principales científicos (Arquímedes, Eratóstenes, Galileo, Newton, Cavendish, Young, Foucault, Rutherford, Bohr, Schrödinger, Heisenberg o Einstein), con sus experimentos (algunos de los cuales pueden reproducirse en cualquier hogar), al tiempo que recorre la historia de la disciplina y sus progresos. Tras la lectura de este ameno libro, la física dejará de ser una materia árida para convertirse en una aventura de la inteligencia.

«Un derroche de amenidad y capacidad divulgativa.»

EMILIO LAHERA

PVP B

ISBN 978-84-8346-353-6



9 788483 463536

www.debolsillo.com

CIENCIA



Manuel Lozano Leyva es uno de los físicos nucleares españoles más conocidos en el mundo. Actualmente dirige el departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Sevilla. Tras realizar su tesis doctoral en Oxford con el profesor Hodgson, trabajó en el Instituto Niels Bohr de Copenhague, en la Universidad de Padua, en el Instituto de Física Nuclear de Daresbury y en la Universidad de Munich. Es miembro del CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares), ha formado parte de la junta directiva de la Real Sociedad de Física y representante de España en el Comité Europeo de Física Nuclear.

MANUEL LOZANO LEYVA

DE ARQUÍMEDES A EINSTEIN

LOS DIEZ EXPERIMENTOS
MÁS BELLOS DE LA FÍSICA

A Anibal Lozano Rivera,
Una bella experiencia

Diseño de la portada: Departamento de diseño de Random
House Mondadori
Fotografía de la portada: © Olison

Primera edición en DeBOLSILLO: mayo, 2007

© 2005, Manuel Lozano Leyva
© 2005, Random House Mondadori, S. A.
Travéssera de Gràcia, 47-49. 08021 Barcelona

Quedan prohibidos, dentro de los límites establecidos en la ley y bajo los apercibimientos legalmente previstos, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, ya sea electrónico o mecánico, el tratamiento informático, el alquiler o cualquier otra forma de cesión de la obra sin la autorización previa y por escrito de los titulares del *copyright*.

Printed in Spain – Impreso en España

ISBN: 978-84-8346-353-6
Depósito legal: B. 14.636-2007

Compuesto en Fotocomposición 2000, S. A.

Impreso en Cayfosa-Quebecor, Ctra. de Caldas, km. 3
Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

P 8 6 3 5 3 6

Índice

INTRODUCCIÓN	9
1. Arquímedes. El principio fundamental de la hidrostática ..	13
2. Eratóstenes. Medida de la circunferencia de la Tierra	33
3. Galileo. La caída libre de los cuerpos	47
4. Newton. Descomposición de la luz del Sol	83
5. Cavendish. La constante de gravitación universal	121
6. Young. El carácter ondulatorio de la luz	139
7. Foucault. El movimiento de la Tierra	155
8. Millikan. La unidad de carga eléctrica	173
9. Rutherford. El núcleo atómico	193
10. Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg y otros. La rendija doble	213
EPÍLOGO	245
ÍNDICE ALFABÉTICO	247

Introducción

A un historiador de la ciencia, Robert Crease, se le ocurrió hacer una encuesta sobre los experimentos más bellos de la física. Eligió para ello la revista *Physics World*, de gran difusión en Estados Unidos. Crease recibió más de doscientas respuestas y el resultado, después de publicarse en dicha revista, saltó a las páginas de *The New York Times*, con lo cual infinidad de periódicos, no sólo en sus suplementos de ciencia sino también como información general, se hicieron eco del asunto. En España fue *El País* el que dedicó mayor atención a la «noticia» en su número del 23 de octubre de 2002.

El resultado de la encuesta no sólo me pareció apasionante y me dio mucho que pensar, sino que además provocó bastantes discusiones agradables entre mis colegas y alumnos. Naturalmente, la primera fase de la discusión era si la elección por parte de los físicos norteamericanos había sido acertada y no demasiado sesgada hacia el mundo anglosajón. El resumen de tales elucubraciones de café es que los experimentos elegidos eran excelentes y que sólo uno o dos, no siempre los mismos, se deberían haber incorporado al *top ten*, pero a costa de ninguno concreto, con lo cual la elección de los diez tomaba fuerza.

La segunda parte de las discusiones se centraba en definir lo que significa belleza en un experimento de física. Después de deliciosas divagaciones sobre este aspecto, creo que el denominador común quizá fuera que la belleza de la experiencia se debía a la máxima simplicidad de medios para realizarla y la gran capacidad de cambiar el pensamiento dominante que ofrecieron sus conclusiones.

El orden del resultado de la encuesta, por número de votos, fue el siguiente:

1. Interferencia de los electrones al pasar por una doble rejilla.
2. Caída libre de los cuerpos.
3. Determinación de la carga del electrón con gotas de aceite.
4. Descomposición de la luz del sol por un prisma.
5. Interferencia de la luz.
6. Medida de la fuerza de la gravedad con una balanza de torsión.
7. Medida de la circunferencia de la Tierra.
8. Caída de los cuerpos en planos inclinados.
9. Descubrimiento del núcleo atómico.
10. El péndulo de Foucault.

Me quedé observando la lista durante mucho tiempo y, recordando algunos comentarios de mis colegas, saqué varias conclusiones. La primera, bastante obvia, fue que, si se ordenaban cronológicamente, la concatenación de los experimentos era casi perfecta, dejando aparte el grandioso paréntesis de la Edad Media. La segunda, mucho más sutil, era que casi todos los autores habían perseguido con empeño dilucidar el carácter o la naturaleza de la luz. Entonces fue cuando se me ocurrió escribir un libro en el que se describieran las diez experiencias, porque podía tener cierta unidad y un hilo conductor.

¿A quién podría interesarle un libro así? Dependería de cómo estuviese escrito, de manera que si se presentaban en él todos los intrínquilos técnicos de los experimentos así como la física que descubrían, podría resultarle interesante a algunos profesores de física general y poco más. Además, a estos profesionales poco se les puede enseñar sobre los experimentos referidos, porque los conocen muy bien. Otra posibilidad era escribir un libro para el público en general. ¿Y qué es esto del público en general? No lo sabía, pero en vez de abatirme y puesto que me apetecía escribir el libro cada vez más, lo que hice fue dirigirlo a un lector arquetípico: un padre o una madre de chavales de doce a dieciséis años. Al lector tendría que divertirle, ilustrarle, provocar en él discusiones

con sus hijos y, lo más provechoso, incitarle a reproducir los experimentos que sean reproducibles sin medios técnicos complicados, caros o peligrosos. El resultado lo tiene en sus manos.

Al final del libro le explicaré al lector por qué elegí ese arquetipo, y convendrá conmigo que no ha sido por un afán de dirigirlo a un grupo numeroso, por razones obvias.

Antes de empezar, he de advertir que he alterado ligeramente el resultado de la encuesta de los norteamericanos. Si se observan los experimentos 2 y 8 de la lista anterior, los realizó el mismo científico: Galileo. Con la estructura de libro que diseñé, esto presentaba un inconveniente. Averigüé cuál había sido el experimento que había quedado en el undécimo lugar, y resultó ser el principio fundamental de la hidrostática de Arquímedes. Como siempre he tenido debilidad por el siracusano, lo incorporé y, además, en primer lugar. También he echado mano de otros pequeños trucos, como describir de pasada varios experimentos que a mí me parecen excelentes pero que los norteamericanos no mencionaron. Sólo daré un ejemplo, el gato de Schrödinger, y el resto dejaré que los descubra el propio lector.

El editor, Cristóbal Pera, cuando se mostró de acuerdo en publicar el libro, me miró admonitoriamente apuntándome con un dedo, y yo, como sabía lo que me iba a decir, me adelanté diciéndole: «Ya sé, ya sé: ni una fórmula». No le hice caso al hombre de letras, y espero que reprima las ganas de emplear su rotulador rojo, porque he hecho un uso muy dosificado y claro (espero) de unas pocas fórmulas, de manera que si el lector se las salta, no pasa nada, pero si se esfuerza un poco se sentirá recompensado. Para equilibrar el tedio o el esfuerzo que puedan provocar las descripciones más arduas de los experimentos y conceptos, además de la interpretación de esas pocas fórmulas, me he permitido relajar al lector resaltando algunos aspectos pocos conocidos o escasamente enfatizados en las biografías de los personajes.

Nada más; pase (página) y vea lo que muchos consideran las experiencias más bellas de la historia de la física. Al final, quizá considere que lo de historia de la física podría quedar, simplemente, en Historia.

Arquímedes

El principio fundamental de la hidrostática

Ribera no es uno de mis pintores favoritos; sin embargo, uno de sus cuadros expuestos en el Prado me regocija especialmente: el retrato de Arquímedes.

Ribera lo representó apacible y sonriente, seguramente porque intuitió que el más grande científico e ingeniero de la historia, amigo del rey, con sus méritos reconocidos en vida por amigos y enemigos hasta tal punto que era una leyenda viva, tal persona no podía ser sino apacible y sonriente. Dos de las habladurías en torno a él, una cierta y la otra falsa, reflejan esta dicotomía.

Cuando las tropas de Marcelo saquearon Siracusa, un soldado llegó a casa de Arquímedes. Éste estaba absorto dibujando figuras geométricas. La casa estaba desierta porque los pocos sirvientes y esclavos que le quedaban habían huido. El soldado, ante el lujo de la mansión, instó al extraño anciano a que le dijera dónde estaban las riquezas. Arquímedes le pidió simplemente que no le molestara. El legionario se acercó a él y lo zarandeó con malos modos, arruinando su dibujo. Arquímedes se enfadó mucho, y el legionario consiguió que dejase de gritar degollándolo. Cuando se enteró de que el general Marcelo había dado orden de respetar a aquel viejo impertinente, al soldado le temblaron las piernas.

Para dedicarse a dibujar cuando el enemigo está saqueando tu ciudad después de asediarla durante tres años hay que ser muy apacible. Y más si has sido el artífice principal de la defensa de dicha ciudad.

Esta historia es cierta porque la relatan Diodoro, Cicerón, Plutarco y muchos más cronistas. Efectivamente, «Μη μου τοῦζ κυκλουζ ταραττε»

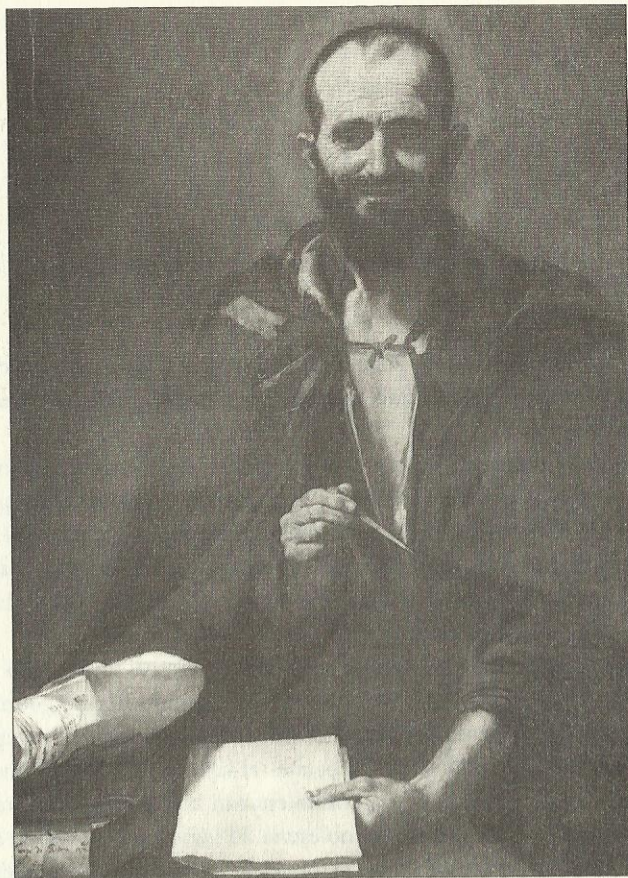


Figura 1.1. Arquímedes, J. Ribera. Museo del Prado.

(«Noli turbare circulos meos», «No fastidies mis círculos»), empezó diciéndole Arquímedes al romano que lo mató.

La siguiente anécdota que todos conocemos del sabio antiguo es falsa, pero para que la gente se invente tal bulo hay que admitir que Arquímedes tenía que ser un tipo simpático. Estaba bañándose en casa,

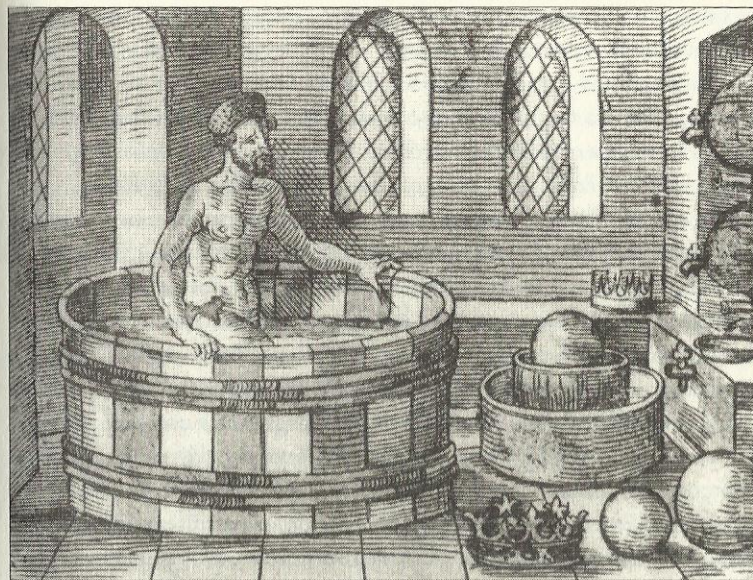


Figura 1.2. Arquímedes en la bañera, Walter Ryff, 1582. Historical Pictures Stock Montage Inc.

enredado con el problema de la corona del rey —que el lector conocerá y que después comentaremos—, cuando no sólo lo resolvió, sino que además vislumbró esplendorosamente el principio general de la hidrostática. Fue tal la alegría que le entró que salió del baño y, en cueros, se fue a recorrer las calles de Siracusa gritando como loco: «Ευρεκα, Ευρεκα!» («¡Lo he encontrado, lo he encontrado!»). Sí, creo que Ribera se imaginó bien cómo era Arquímedes (véase la figura 1.1).

Hay más historias falsas en torno a Arquímedes que nos enseñaron en la escuela y que nos parecieron deliciosas e inolvidables. ¿Quién no recuerda aquello de «Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo», o que las velas de los barcos romanos ardieron porque, a instancias del sabio, enfocaron con lentes la luz del Sol sobre ellas? Puede parecer que tengo ganas de desilusionar al lector, pero he de decir que lo primero

es un error y lo segundo imposible, y Arquímedes no tenía un ápice de estúpido ni de ignorante.

Supongamos que Arquímedes hubiera dispuesto de su punto de apoyo y que era tan robusto que podía levantar sesenta kilos. Según la ley de la palanca establecida por él mismo, para mover la Tierra un centímetro el brazo largo de la palanca debería tener una longitud de... miles de años luz. Vamos a suponer que, al menos en sueños, lo conseguiría. Tendría que estar tirando con todas sus fuerzas durante... billones de años. El universo tiene trece mil setecientos millones de años de antigüedad. Arquímedes no conocía la masa de la Tierra, pero estoy seguro de que no dijo ni escuchó tal barbaridad, porque hubiera sabido que era un dislate.

La imposibilidad de quemar velas de naves con lentes es más complicada de explicar. Hay que enfocar una lente de gran tamaño a unos centenares de metros de distancia con respecto a las velas durante cierto tiempo. Este tiempo depende, sobre todo, del diámetro de la lente, porque el Sol nos da, como máximo, unos 400 vatios por metro cuadrado. Para encender una vela haría falta... ¿qué más da, si el problema de verdad no es éste? El problema de verdad sería convencer a los capitanes de las galeras romanas de que las dejaran absolutamente inmóviles en el mar durante mucho tiempo, para que los siracusanos pudieran apuntarles bien. Por supuesto, se tendrían que quedar quietos no en cualquier sitio, sino a una distancia exacta de la lente, o bien navegar en un círculo de radio exactamente igual a esa distancia con centro en la lente. El problema de verdad sería lograr enfocar una lente de gran peso y mantenerla estable. El problema de verdad sería pulir una lente enorme, cuando Arquímedes, que ya había descubierto las leyes de óptica geométrica necesarias, apenas era capaz de fabricar unas gafas. Para colmo de sinsentidos, ¿para qué querría Arquímedes quemar las velas de las galeras romanas si éstas cuando no había viento se movían a remo?

Pero, bueno, entonces, ¿qué hizo Arquímedes? Auténticas maravillas. Galileo, Newton, Kepler, Gauss, Maxwell, ¡Einstein!... ¿Cuántas veces hemos oído que ellos fueron los padres de la ciencia moderna? Muchas, y es cierto, pero el abuelo fue Arquímedes. Los auténticamen-

te grandes filósofos griegos, culminando en Epicuro y Arquímedes, y por otra parte los ingenieros y administradores romanos, lo dejaron todo listo para entrar en la modernidad científica, tecnológica, social y política, pero, en buena parte por culpa de la influencia de Platón y su discípulo Aristóteles, hubo que esperar hasta los ilustrados del XVIII. Seguramente no hubiera sido necesario ni siquiera el Renacimiento, a pesar de toda su grandeza. Pero ésta es otra historia, aunque no podemos dejar pasar la oportunidad de lamentarnos por el manto de ignorancia y oscurantismo que cubrió Europa durante casi dos mil años.

Arquímedes nació en una familia culta de la clase alta siracusana. Su padre, Fidias, era astrónomo y noble en el sentido de que estaba emparentado con la familia real. De hecho, el dictador Hierón II, que fue rey de Siracusa a lo largo de casi toda la vida de Arquímedes, era no sólo amigo de éste, sino también su primo carnal. Arquímedes murió en 212 a.C., a los setenta y cinco años, y el rey en 215, a los noventa y uno.

En cuanto Fidias se percató de que su hijo era listo de verdad, lo envió a Alejandría a estudiar con los sucesores de Euclides. Así pues, la formación básica de Arquímedes fue como matemático puro: nada de aplicaciones ni espíritu de ingeniero. Allí hizo un montón de amigos que lo fueron durante toda su vida; de hecho, la obra de Arquímedes se conserva casi toda en forma de cartas a ellos, en particular a Eratóstenes, a quien le dedicaremos el próximo capítulo.

Pero aunque nuestro héroe era buen amigo y compañero (muchos de los avances de sus colegas se los debían a él, según confesaron casi todos), la vida elitista, retirada y exclusiva de los estudiantes mimados de Alejandría no iba con él, por lo que regresó pronto a Siracusa. Ésta era a la sazón la ciudad-estado más importante de Sicilia y una de las más ricas de Grecia. Además, Arquímedes era rico y amigo del rey, así que podía dedicarse tranquilamente a pensar e inventar sin preocupaciones. Todo ello lo hizo Arquímedes con una entrega absoluta.

El carácter de Arquímedes queda reflejado también en la siguiente anécdota, que sí está perfectamente establecida y documentada; en concreto, en el prefacio de su libro *Sobre las espirales*. Cuenta que envió a sus amigos de Alejandría, por separado y uno a cada uno, los enunciados de

sus últimos teoremas sin demostración. Más adelante les escribió diciéndoles que había dos teoremas falsos y que si alguno se había apropiado de la autoría de tales teoremas, naturalmente sin demostrarlo, había pretendido descubrir lo imposible. Después les envió las demostraciones de los teoremas correctos.

Además del libro sobre las espirales, Arquímedes escribió muchos otros libros de matemáticas, libros que contienen resultados que desde entonces y hasta hoy se enseñan en las escuelas. Por ejemplo, aquello de que la superficie de una esfera (piense el lector cómo se mide en la práctica una superficie curva) es exactamente cuatro veces mayor que la superficie de su círculo máximo. O que el volumen de un cilindro es la superficie de la base por la altura. En la escuela nos lo enseñaron así: superficie de la esfera = $4\pi r^2$; volumen del cilindro = $\pi r^2 h$. Y la π era 3,1416, ¿verdad? Pues incluso esto lo descubrió Arquímedes. Lo hizo estudiando con gran atención la relación entre la longitud de la circunferencia y su diámetro. Esta división siempre le salía aproximadamente lo mismo, tuviera el círculo el tamaño que tuviera. Y ese número, que lo tenía acorralado entre 3,1408 y 3,1429, salía en casi todas sus fórmulas geométricas. Intente calcular el lector con hilos, reglas, compases, etc., las superficies y volúmenes de cuerpos sencillos y se dará cuenta de que el asunto no es trivial. Además, Arquímedes había heredado de la Antigüedad una forma de enumerar tan endiablada que inventó otra.

Efectivamente, los griegos representaban los números del uno al nueve por medio de las primeras letras del alfabeto: de la α a la ι , de la alfa a la iota; las decenas de 10 a 90, por las nueve letras siguientes, $\kappa\lambda\mu\nu\xi\omicron\pi\rho\varsigma$, y así sucesivamente. Obviamente, como representación de números, aunque en un texto se convirtiera en un galimatías, la cosa no estaba mal, pero para hacer operaciones complicadas como las que hacía Arquímedes, el sistema no funcionaba. Los babilonios habían utilizado el sistema sexagesimal (que en una pequeña parte todavía hoy usamos: los minutos de la hora, los segundos de los minutos, los grados de la circunferencia, etc.), pero los griegos no lo utilizaban. En un libro llamado *El cálculo de los granos de arena* que Arquímedes dedicó a su

medio sobrino Gelón, el hijo de Hierón, pretende establecer un sistema para contar todos los granos de arena del mundo. Se quedó corto porque llegó hasta 99.999.999, o sea, la octava potencia de diez menos uno. Al sistema le llamó «de las octadas» y, aunque no era perfecto, permitía maravillas con las operaciones de la época en cuanto a cálculos donde intervenían números grandes o precisos.

Lo último que me gustaría resaltar de la investigación básica de Arquímedes —antes de comenzar a hablar de las aplicaciones y de su maravilloso principio fundamental de la hidrostática— es algo que puede parecer raro o abstracto, pero que sentó las bases para el cálculo infinitesimal del siglo XVII.

Si el lector me ha hecho caso y ha tratado de calcular (o, mejor, medir) el número pi como razón entre la longitud de una circunferencia y su diámetro, casi seguro que no se le ha ocurrido hacerlo inscribiendo polígonos en el círculo. Eso fue lo que hizo Arquímedes: inscribir polígonos regulares de lados exactamente iguales, cada vez más cortos y cada vez mayor número de ellos. Así inventó el cálculo infinitesimal.

Arquímedes no le daba mucha importancia a sus inventos. Esto es curioso, porque eran los que le proporcionaban fama y cariño popular. Pero aunque escribió muchos libros sobre matemáticas y física, sus ingenios los tuvieron que describir otros, porque él no se molestaba en tal tarea. La base de muchos de ellos fue la polea múltiple o polipasto, que a su vez se fundamentaba en la palanca. Estos ingeniosos y simples mecanismos permiten multiplicar la fuerza aplicada por medio de, por ejemplo, una cuerda. Se basan en la conservación de la energía expresada como conservación del trabajo. Es muy sencillo y nos lo enseñaron en la escuela (véase la figura 1.3).

El trabajo no es más que el producto de la fuerza aplicada a un cuerpo por el desplazamiento que le provoca. Por supuesto, hay que descontar el rozamiento, pero si suponemos que éste es mínimo y lo eliminamos de las cuentas, vemos que poca fuerza por gran desplazamiento equivale a mucha fuerza por poco desplazamiento, siempre en rigurosa proporcionalidad. Así, en una polea múltiple de Arquímedes,

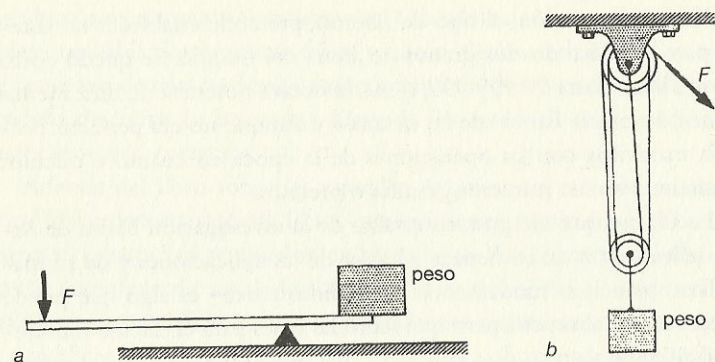


Figura 1.3. La palanca de Arquímedes (a). El producto de la fuerza aplicada en un extremo por la distancia hasta el punto de apoyo es igual al del peso por lo que dista éste de dicho punto. El polipasto o polea compuesta de Arquímedes (b). Esta máquina simple proporciona una ventaja mecánica de la fuerza aplicada en relación al peso.

en un extremo hay que jalar mucha cuerda con poca fuerza, pero en el otro extremo el desplazamiento será escaso aunque la fuerza puede llegar a ser tremenda. Unos pocos hombres fuertes tirando con brío y entusiasmo de un extremo podían darle la vuelta a toda una galera romana lenta pero inexorablemente. Por supuesto, había que inventar un sistema para colgar las poleas y atrapar la galera, pero eso no era nada para Arquímedes. El lector puede ver en las figuras las argucias que utilizaba y comprenderlas sin dificultad (véase la figura 1.4).

Todos conocen cómo funciona una catapulta de Arquímedes, pero lo más ingenioso del siracusano fueron los sistemas de puntería que inventó para sus ingenios artilleros. Con juegos de poleas, arcos de circunferencia graduados vertical y horizontalmente, nudos a intervalos regulares y algunos trucos más, las catapultas de Siracusa lanzaban piedras de hasta 250 kilos con una precisión de seis a una, o sea, que de cada seis proyectiles lanzados, uno de ellos alcanzaba a la galera romana: la zona tocada quedaba hecha astillas.

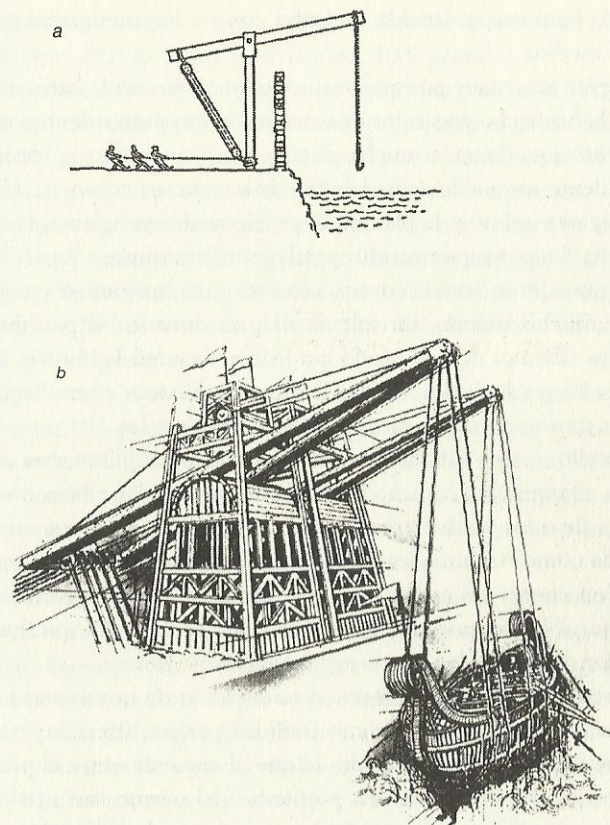


Figura 1.4. Mecanismo ideado por Arquímedes contra las galeras romanas en el asedio a Siracusa (a). Representación artística del funcionamiento del artillugio (b).

Vamos ya con el principio fundamental de la hidrostática. La cosa comenzó con el asunto de la corona de Hierón.

Cada rey, naturalmente, ha de tener su corona. En realidad, por aquella época el rey no lucía corona porque, salvo contadas ocasiones, la lucía la estatua de un dios o una diosa, y no era propiamente una corona,

sino más bien una guirnalda de laurel con las hojas engastadas en un aro a la medida.

Hierón, no se sabe por qué, sospechó que el joyero le había engañado y le había hecho pagar por una corona de oro puro mientras que seguramente aquella tenía mucha plata barata. Pero, como es natural, un rey prudente no puede acusar de fraude a nadie así como así. Llamó a su inteligente primo y le planteó el problema de averiguar si la corona era buena sin, por supuesto, estropearla lo más mínimo.

Arquímedes se llevó la corona a su casa y, me imagino, se quedó mirándola mucho tiempo, sin soltarla ni para dormir. Ni para bañarse, vaya, y ya sabemos de qué modo tan jocoso terminó la historia. La corona resultó ser auténtica. O sea, de oro puro. Veamos cómo llegó a tan feliz conclusión el limpio, alegre y liberal Arquímedes.

Para ello, vamos a demostrar primero que los cronistas, que empiezan con el arquitecto romano Vitrubio, del siglo I, describieron mal los métodos llevados a cabo por Arquímedes. Después haremos una inferencia de cómo Arquímedes descubrió la autenticidad de la corona teniendo en cuenta sus escritos sobre el principio de la hidrostática. No se aburra el lector, porque los escasos cálculos que hay que hacer se consiguen aplicando las cuatro reglas básicas.

Nuestro genio ya había tomado nota escrita de que cuando estaba en el baño «movía las piernas con facilidad porque parecían pesar menos». También se había percatado de que el cociente entre el peso y el volumen de un cuerpo era una propiedad del mismo casi más interesante que aquellas dos por separado; recordemos la habitual pregunta sobre si pesa más un kilo de madera o uno de plomo. Pesan lo mismo, es cierto, pero, más allá del juego de palabras, el volumen de cada kilo es distinto, ¿no? Pero ¿y si se trata de dos esferas idénticas, una de plomo y la otra de madera? La de plomo pesa más, obviamente. La manera de dejar de precisar si estamos hablando del mismo peso o el mismo volumen es definir su cociente como densidad o peso específico. El plomo tiene una densidad de 11,3 gramos por cada centímetro cúbico (escribámoslo como es habitual g/cm^3). El agua, $1 \text{ g}/\text{cm}^3$; la madera, según de qué clase sea, normalmente menos de $1 \text{ g}/\text{cm}^3$, etc. Arquímedes

ya había confeccionado algunas tablas de densidades, entre las que estaba la del oro, $19,3 \text{ g}/\text{cm}^3$, y la de la plata, $10,6 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Pero todos estos conocimientos no le servían para nada a Arquímedes porque no tenía buenos instrumentos: una cosa es lanzar un peñascito contra una galera y otra medir unos pocos centímetros cúbicos o unos pocos gramos, porque estamos hablando de lo siguiente:

La corona de laurel más grande encontrada hasta ahora de los tiempos de Arquímedes pesa 714 gramos. Como puede que haya perdido algunas hojas, vamos a suponer que la corona de Hierón pesaba 772 gramos. Si hubiera sido de oro puro habría tenido un volumen de $772 \text{ g}/19,3 \text{ g}/\text{cm}^3 = 40 \text{ cm}^3$.

Ahora vamos a suponer que la corona tenía un 25 por ciento de plata, o sea, 193 gramos. El volumen que aporta la plata a esta corona trucada sería $193 \text{ g}/10,6 \text{ g}/\text{cm}^3 = 18,2 \text{ cm}^3$. El oro restante, 579 g, contribuye con 30 cm^3 ; así pues, la corona falsa ocupa $48,2 \text{ cm}^3$. La diferencia entre una corona y otra sería de $8,2 \text{ cm}^3$. Es necesario medir, así que hay que ver si esto era viable para Arquímedes.

Por muy grande que Hierón tuviera la cabeza, la corona no tendría más de 20 centímetros de diámetro. Contando con las hojitas de laurel y demás, supongamos que el recipiente mínimo para introducir la corona en agua, como siempre se ha dicho que hizo Arquímedes, era circular y tenía 25 centímetros de diámetro. Esto, aplicando las fórmulas de Arquímedes de cuando estaba en Alejandría, nos da una superficie de 491 centímetros cuadrados. La diferencia de nivel que provocaría en el recipiente la plata de la corona falsa respecto a la de oro puro sería $8,2 \text{ cm}^3/491 \text{ cm}^2 = 0,017 \text{ cm}$: ¡menos de dos décimas de milímetro! Esto no podía verlo Arquímedes ni siquiera con las lupas que decían que quemaban las velas de las galeras romanas. Esto es lo que nos han contado que hizo Arquímedes desde los cronistas romanos hasta nuestro maestro de escuela. Aún peor es cuando se dice que donde metió la corona real fue en la bañera. No, lo que le hizo gritar «¡Eureka!» a Arquímedes fue, con certeza, lo siguiente:

Convirtamos la diferencia entre la corona falsa y la verdadera en peso de agua desalojada y no en volumen. Como se ha dicho, la den-

sidad del agua es de 1 g/cm^3 , por lo que la corona de oro desaloja 40 gramos de agua y la de aleación de plata y oro 48,2 gramos. ¿Podía medir Arquímedes una diferencia de 8,2 gramos? Pues claro que podía.

Arquímedes era un hombre rico, así que tenía oro. Equilibró a la perfección la corona con cierta cantidad de oro: exactamente 772 gramos. Lo hizo en una balanza de las que había utilizado para formular la ley de la palanca. Era muy fácil. La balanza así dispuesta fue lo que introdujo, ahora sí, en la bañera. Si la corona hubiera sido falsa, la balanza se habría desequilibrado a favor del brazo que contenía el oro. Si el cuarto de baño tenía las ventanas cerradas para evitar corrientes y Arquímedes no chapoteaba lo más mínimo, unos pocos gramos hubieran bastado para desequilibrar la balanza. Pero permaneció en equilibrio. La corona era de oro puro.

¿Y por eso se puso Arquímedes loco de contento? Ni hablar. Al estar tan quieto y callado en la bañera durante tanto tiempo, esperando que la balanza se moviera, seguramente se dio cuenta de que aquello de desalojar fluido era algo grande. Tanto al oro bruto como a la corona le estaba pasando lo mismo que a sus piernas: parecían pesar menos al estar inmersos en el agua. Lo que descubrió Arquímedes es que experimentaban un empuje hacia arriba igual al peso del agua desalojada, de forma que el paso «efectivo» era menor. Lo que se notaba era la diferencia entre el peso y el empuje.

¿Cuál es el origen de esta fuerza vertical que hemos llamado «empuje» y que otros llaman «fuerza boyante» o «fuerza de flotación»? No es trivial, y creo que Arquímedes llegó a poco más que intuir tal origen. A esa fuerza se la podría relacionar incluso con el *horror vacui*.

La fuerza de la gravedad terrestre atrae hacia el centro de la Tierra a todo cuerpo que tenga masa no nula. La intensidad de esta fuerza es proporcional a la masa del cuerpo en cuestión.

Consideremos un cubo perfecto de cobre de 10 centímetros de arista. Su volumen es $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3 = 1 \text{ litro}$. La densidad del cobre es $8,92 \text{ g/cm}^3$, así que el cubo pesa 8,92 kilos (kg), por lo que la fuerza con que lo atrae la Tierra es proporcional a 8,92.

Vamos a sumergir el cubo de cobre en la bañera de Arquímedes, pero antes imaginémonos un cubo de agua exactamente igual que el de cobre en el seno de la bañera. Pesa un kilo (véase la figura 1.5).

La superficie superior del cubo imaginario soporta el peso de la atmósfera más el peso de la columna cuadrada de agua que va hasta la superficie. La superficie inferior soporta lo mismo más el peso del cubo de agua. Ahora colocamos el cubo de cobre en el lugar del cubo de agua. ¿Qué ha cambiado desde el punto de vista de las fuerzas? Nada, porque todo el «mundo exterior» al cubo permanece idéntico, salvo que el peso del cubo ahora es 8,92 kg en lugar de 1 kg. Si el resto de las fuerzas siguen siendo las mismas, el resultado neto es que el cubo de cobre se comporta como si pesara 7,92 kg. Lo que hay que restar es el peso del volumen de agua desalojada, no otra cosa, y en consecuencia Arquímedes tenía razón. El lector puede imaginar lo siguiente: de pronto, como por ensalmo, el cubo de cobre inmerso en agua se esfuma. Obviamente, el agua de alrededor llenaría de inmediato el vacío dejado. ¿Y si lo que desaparece es un cubo de agua de las mismas dimensiones? ¿O de hierro, de piedra, etc.? El hueco se llenaría de la misma forma. En efecto, las fuerzas externas son las mismas sea el cuerpo sumergido del material que sea. Lo que cuenta es el peso del agua desalojada (véase la figura 1.5a).

¿Qué pasa si ese volumen desalojado pesa más que el cuerpo? (Pienso el lector, por lo dicho anteriormente, que es lo mismo que si se dijera que la densidad del cuerpo es menor que la del agua.) Pues que la fuerza boyante de empuje hacia arriba es mayor que el peso: el cuerpo flota (véase la figura 1.5b). ¿Qué hacen los submarinos? Jugar con estas fuerzas a base de llenar ciertos contenedores de aire comprimido o inundarlos de agua según convenga, todo de forma muy controlada, y navegar a la profundidad que ordene el capitán.

Cuando yo era pequeño nada era más divertido en la playa que jugar con un flotador hecho simplemente de una cámara de neumático bien hinchada. Una de coche daba para varios chiquillos; una de tractor divertía a toda una pandilla. Entre los juegos había uno que siempre se intentaba sin éxito: hundir la cámara. ¿Por qué era tan difícil? Uno

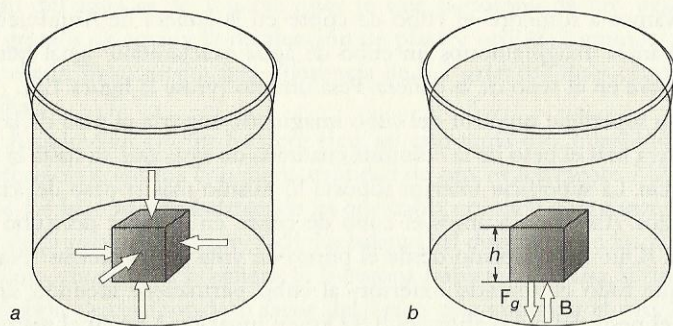


Figura 1.5. Las fuerzas internas ejercidas sobre un cuerpo sumergido en un fluido son perpendiculares a las paredes en todos los puntos (a). Las fuerzas externas que actúan sobre el cubo son la de la gravedad F_g y la boyante o de flotación B . En condiciones de equilibrio, ambas son iguales aunque de direcciones opuestas (b).

puede imaginarse que si en lugar de aire estuviera llena de agua, el flotador se hundiría lenta e inexorablemente. Forcemos la imaginación aún más. Si el caucho de la cámara se sustituyera por un material de la misma densidad que el agua, ¿qué pasaría? Que la cámara se hundiría, pero no hasta el fondo: se quedaría suspendida donde la dejáramos sumergida en el agua. Hay una escena dramática en la película *Titanic* que el lector quizá recuerde. Al ingeniero que había diseñado el barco le preguntan aterrados cómo es posible que un ingenio tan moderno pueda irse a pique. El ingeniero simplemente responde que cualquier barco puede hundirse. Sin embargo, alguna vez hemos visto propaganda de embarcaciones de recreo y de salvamento insumergibles. Tanto el ingeniero de la película como la propaganda llevan razón: los barcos están hechos en su mayor parte de acero, y cuando se inundan no desalojan agua, ya que no experimentan empuje hacia arriba y se hunden por su propio peso. Los barcos antiguos de madera se hundían también, porque, aunque la madera flote en agua, en su estructura llevaban gran cantidad de hierro en forma de clavos, zunchos, etc., amén del lastre, de

plomo o de grava, que les daba estabilidad. Los barcos insumergibles modernos están hechos de materiales que en su conjunto tienen una densidad menor que la del agua. Así, aunque se inundan completamente, seguirán flotando. Pero parece que son poco prácticos para muchas cosas y por eso no pueden sustituir todavía a la mayoría de los barcos hechos con los materiales tradicionales. En cualquier caso, la densidad 1 g/cm^3 del agua no es pequeña. Un kilo por litro. La cámara bien hinchada de un neumático desaloja decenas de kilos, y el esfuerzo que eso exige para hundirla no es poco para unos chavales (véase la figura 1.6).

Tome nota el lector de un aspecto de esta historia. Se construyen barcos desde tiempos inmemoriales, antes de Arquímedes. En este caso nos encontramos con la explicación científica de una tecnología mucho después de su desarrollo, lo cual no es raro a lo largo de la historia de la humanidad, pero tampoco es frecuente. Lo normal es que se tarde bastante (aunque cada vez menos) en encontrarle aplicaciones a los hallazgos científicos.

Nos hemos referido al agua, pero el principio de Arquímedes se aplica a cualquier fluido. Por ejemplo, el aire. Si conseguimos artefactos de menor densidad que el aire, o sea, que desalojen una cantidad de aire que pese más que el artefacto, éste flotará. Es el caso de los globos de feria, los aerostatos y los zepelines.

Llamo la atención del lector sobre algo que Arquímedes sospechaba porque había leído todos los logros de sus antecesores —por ejemplo, Demócrito y los atomistas—, pero que no pudo explicar. Los cuerpos están hechos de átomos, y todas las propiedades de aquéllos provienen de las propiedades de éstos. Hoy día sabemos que si hablamos así, de «cuerpos», solemos estar refiriéndonos a objetos de la vida cotidiana, o al menos que los podemos percibir con los sentidos. En este caso, es más apropiado hablar de moléculas que de átomos. Pero la distinción no importa demasiado, porque al fin y a la postre las moléculas no son más que grupos aislados de átomos. ¿Cómo imaginaría Arquímedes que serían las entrañas moleculares (o atómicas) de un cuerpo más denso que otro? Concluiría que o bien los átomos de plomo son más pesados que los de madera o son más pequeños y caben más en un cierto vo-

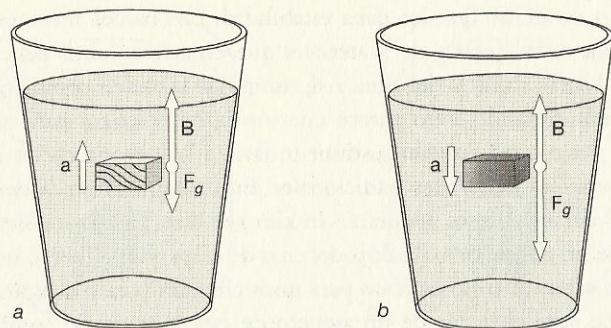


Figura 1.6. Un objeto sumergido menos denso que el fluido en cuyo seno se encuentra experimenta una fuerza neta hacia arriba: flota; sobre otro más denso que el fluido la fuerza neta se dirige hacia abajo: se hunde.

lumen. Arquímedes no se preocuparía mucho por averiguar cuál de las dos razones era la correcta, porque sabía que los átomos eran inaccesibles para él, que no contaba más que con la razón y el ingenio porque tenía muy pocos instrumentos. Pero ¿y el agua misma? ¿Conocía Arquímedes el hielo? No sólo lo conocía, sino que sabía que era agua que alcanzaba ese estado cuando se enfriaba mucho, o sea, que el hielo estaba hecho de los mismos átomos que el agua. ¿Por qué flotaría el hielo en agua? Ni idea, fue la conclusión de Arquímedes, y se resignó a no saberlo nunca. El lector lo entenderá fácilmente, pero quiero resaltar que, a diferencia de Platón y Aristóteles, Arquímedes sabía cuándo era necesario callar y no delirar apoyando los desatinos en argucias dialécticas y autoridad.

La molécula de agua la forman dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Los tres están unidos entre sí por fuerzas muy poderosas. Pero una molécula de agua y otra también se atraen, y se establece entre ellas un enlace más débil pero pertinaz, llamado «puente de hidrógeno». Cuando el agua está a más de cien grados en condiciones normales, este enlace es prácticamente inexistente porque las moléculas andan tan enloquecidas, es decir, se mueven tan deprisa, que no da

tiempo a que se establezca una cosa tan delicada como la unión por puente de hidrógeno. Las moléculas de agua están bastante separadas unas de otras y cada una va a su aire. Se dice que el agua está en estado de vapor.

En el agua líquida, cuando está entre cero y cien grados centígrados, los puentes de hidrógeno se rompen, se rehacen, vuelven a formarse, se destruyen y así continuamente a un ritmo marcado por la temperatura. Pero cuando el agua se hiela... ¡zas!, ocurre algo mágico: todo aquello adquiere un orden armonioso. Se forma una maravillosa estructura que deja huecos bastante grandes entre grupos de moléculas de agua. Por ello estas mallas cristalinas tienen una densidad menor que la del agua líquida: los cubitos de agua flotan y, por supuesto, también los bellos y temibles icebergs de los mares fríos (véase la figura 1.7).

Hablando de frío, agua y el principio de Arquímedes, hay una conjugación encantadora de los tres. Hemos dicho que el agua tiene una densidad de 1 g/cm^3 y que se hiela a 0°C . Es correcto en unas condiciones, digamos, normales. Pero incluso en estas condiciones la densidad del agua no es siempre de 1 g/cm^3 . A la gélida temperatura de 4°C la densidad del agua se hace máxima. No mucho mayor que 1 g/cm^3 , pero máxima. Esto tiene grandes consecuencias. Por el principio de Arquímedes, el agua a 4°C «se hundirá» en el agua que esté a una temperatura distinta a ésta. Pensemos en un plácido lago a buena latitud norte. Llega el invierno. El sol calienta cada vez menos. La temperatura del aire baja de cero grados. La del agua que está en contacto con él, la de la superficie, empieza a enfriarse. Pero cuando ésta llega a 4°C , se hunde en la que aún guarda el calor del verano. Ésta aflora a la superficie y el aire de nuevo tiene que hacer su trabajo enfriándola. Cuando llega a 4°C , toda esta agua vuelve a hundirse. Los peces y toda la fauna que vive en él siguen viviendo: aterida, pero viva. Naturalmente, si el frío es muy intenso, llegará el momento en que toda el agua del lago esté a 4°C . Entonces podrá seguir enfriándose. Cuando la de la superficie alcance los 0°C se helará, pero esa capa de hielo abrigará al agua interior que sigue a 4°C . Mucho, mucho frío tiene que hacer para que se hiele todo el lago, dejando congelada su fauna antes de que llegue la prima-

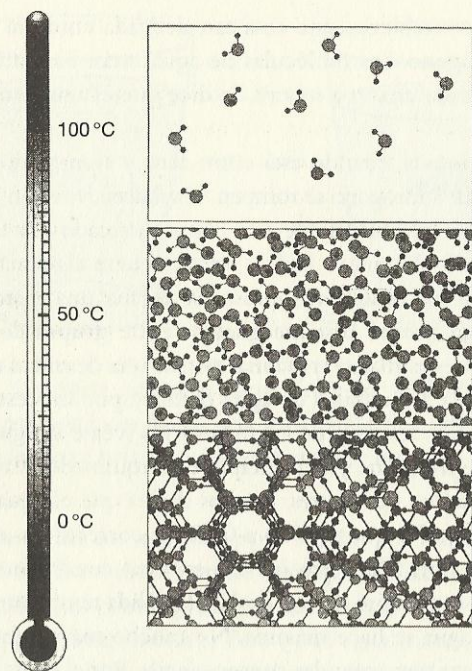


Figura 1.7. Disposición de las moléculas de agua (los círculos grandes representan al átomo de oxígeno y los pequeños los de hidrógeno) en los tres estados: vapor, líquido y hielo.

vera. ¿No es bella la conjunción de esa insólita propiedad del agua y el principio de Arquímedes?

La influencia de Arquímedes en la historia de la ciencia ha sido curiosa. A sus contemporáneos apenas les influyó más allá de sus inventos para la defensa militar y otros usos prácticos. Los aspectos matemáticos de su obra, los más importantes tal como él los consideraba, no empezaron a adquirir relevancia hasta que sus libros fueron traducidos al árabe en los siglos VIII y IX... ¡casi mil años después de haber sido escritos! Gran parte de la matemática árabe estuvo inspirada en los cálculos

y teoremas de Arquímedes, pero la eclosión de las teorías del siracusano tuvo lugar en Europa muchos siglos después. A mediados del siglo XVI, varias imprentas suizas e italianas tradujeron directamente del griego los escritos de Arquímedes. Así es como llegó su obra al gran Galileo primero y a Kepler, Newton, Descartes, Fermat, etc., después.

Los científicos somos, sin ningún género de duda, la gente que tiene que pasar más exámenes. Primero, todos los normales hasta llegar al doctorado. Después, lógicamente, las oposiciones para obtener un puesto estable en una universidad u otro organismo de investigación. Pero entretanto, la cosa continúa sin cesar: cada vez que enviamos a una revista un artículo con nuestros resultados, sufre un procedimiento editorial en el que se examina el trabajo con una meticulosidad muchas veces exasperante. Entre otras cosas porque lo hacemos los propios científicos de manera anónima. Además, hay que someter a examen nuestras propuestas de investigación para que, si son aprobadas, reciban financiación; una vez al año nos evalúan los estudiantes con encuestas; cada seis años lo hace el ministerio para decidir si hemos hecho investigación merecedora de que nos suban un poco el sueldo, cada cinco años... ¿para qué continuar? Para lo siguiente. Lo último que hemos inventado los científicos para mortificarnos es el Science Citation Index. Se trata de una base de datos internacional en la que se recoge el número de veces que un artículo determinado de un autor concreto es citado en las revistas por sus colegas de todo el mundo. No sólo hay que publicar pasando todos los exámenes pertinentes, sino que además el artículo tiene que tener cierto impacto en la comunidad científica. Cuando uno de nosotros acumula varias decenas de citas de un artículo se pone muy contento. Estamos hablando de comunidades científicas, por ejemplo, de físicos teóricos o de biólogos moleculares, de centenares de miles de miembros. Un solo autor, nada más y nada menos que Galileo, citó en sus escritos a Arquímedes más de cien veces. ¿Habría habido alguien más influyente en la ciencia que el apacible y sonriente Arquímedes? No pudo contener la maquinaria de guerra romana, pero la formidable Roma pasó a la historia, y la obra de Arquímedes está con nosotros y se quedará mientras el hombre exista y piense.

Eratóstenes

Medida de la circunferencia de la Tierra

En la historia se han dado situaciones, bien que raras, en que no hacer caso a los consejos de científicos y expertos ha resultado positivo. Por ejemplo, no estuvo nada mal que Isabel la Católica antepusiera su intuición política a la opinión correcta de sus frailes consejeros de que la longitud de la Tierra que Colón esgrimía en su solicitud de financiación para su viaje a las Indias era mucho más pequeña que la real.

¿Cuál era la real y cómo se había medido? La circunferencia polar, es decir, la longitud del meridiano que pasa por los polos terrestres, es de 39.942 km, y la circunferencia ecuatorial, o sea, la longitud del ecuador, es de 40.074 km. Como puede verse, el achatamiento de nuestro planeta por los polos es muy leve: apenas un 0,33 por ciento. La mejor medida del meridiano en la Antigüedad data, nada menos, que de 235 a.C. y la llevó a cabo Eratóstenes de Cirene, uno de los directores más ilustres de la magna Biblioteca de Alejandría.

¿Por qué hace frío en invierno y calor en verano? No me extrañaría que el lector no conozca la razón de la sucesión de las estaciones a lo largo del año, porque recuerdo varias encuestas, algunas hechas entre profesores de universidad, en que prácticamente ninguna respuesta era acertada. Ni siquiera sensata. La más extendida era que la Tierra gira en torno al Sol a lo largo de una elipse en vez de una circunferencia. En consecuencia, como además el Sol no está en el que se podría definir como centro de la elipse sino en uno de sus focos, la Tierra pasa por puntos más cercanos y más lejanos al Sol a lo largo del año que tarda en dar una vuelta completa. El momento de estos tránsitos marcaría el ini-

cio del verano y el invierno. La primavera y el otoño serían etapas intermedias entre cada una de las anteriores estaciones extremas.

No es que dicha respuesta sea errónea, sino que lo que ocurre es justo lo contrario: la Tierra está más cerca del Sol en invierno que en verano. De todas formas, la excentricidad de la órbita elíptica (el achatamiento del círculo) es tan pequeño que la diferencia entre el punto más cercano y el más lejano tendría unas consecuencias mínimas sobre el clima. Además, ¿cómo se explicaría así que el desfile de estaciones esté desfasado justo seis meses en el hemisferio sur respecto al norte? ¿Cómo se explicaría así que el Sol esté más alto en el cielo en verano que en invierno? ¿Por qué la duración de los días y las noches varía a lo largo del año? ¿Por qué no sale y se pone el Sol por el mismo punto cada día? No, la causa de las estaciones es que el eje de rotación de la Tierra, en torno al cual da una vuelta cada veinticuatro horas, forma un ángulo de 23,5 grados en relación al plano que contiene la órbita que sigue alrededor del Sol. Si el lector quiere responder a las preguntas anteriores tiene que pasarse un buen rato observando con atención la figura 2.1.

Si el lector lo ha comprendido, puede saltarse el párrafo siguiente. Sitúese mentalmente sobre España en el dibujo de la Tierra. Empecemos por el solsticio de invierno, momento del año y punto correspondiente de la trayectoria en que el Sol nos da más «de refilón». Si miramos al Sol lo veremos bajo, ¿verdad? La Tierra va girando plácidamente sobre su eje, por lo que en todo el hemisferio norte las horas de luz son escasas. Al hemisferio sur el Sol le da de lleno, por lo que allí están en verano. Vamos ahora al lado opuesto del dibujo: en el solsticio de verano pasa justo lo contrario. Quizá cuesta percatarse de que el Sol, visto desde nuestra latitud norte, está mucho más alto en el cielo (¿exactamente 23,5 grados más que en invierno?). Las etapas intermedias, la primavera y el otoño, marcadas por los llamados equinoccios, son ya fáciles de entender. Obsérvese que a los países situados cerca del ecuador esto les da bastante igual: todo el año es verano; o invierno, qué importa.

¿Cómo se localiza a una persona en una ciudad? Conociendo sus coordenadas. Por ejemplo, calle tal, número cual, piso, el que sea. Tres

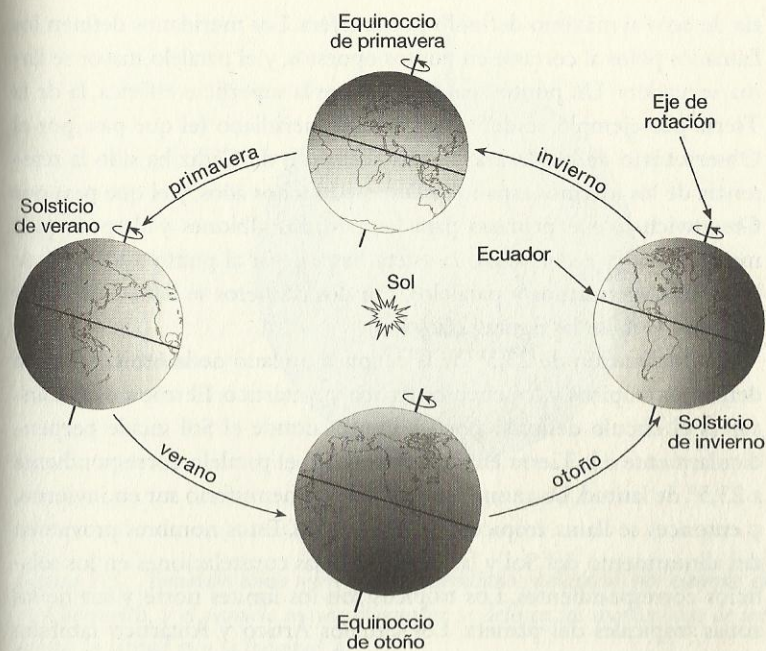


Figura 2.1. Movimiento de la Tierra en torno al Sol. En el solsticio de verano, el Polo Norte se inclina hacia el Sol; en el de invierno, se aleja del Sol. En los dos equinoccios, el Sol incide directamente sobre el ecuador a mediodía.

coordenadas. Si se quiere ser preciso, habría que introducir el tiempo en el juego: la persona estará allí a partir de las seis de la tarde. Definir un punto en una habitación exige más o menos las mismas coordenadas: el alto, el largo y el ancho medidos desde una esquina concreta. Y lo mismo con el tiempo. En una superficie plana se necesita una coordenada menos.

También se pueden definir las coordenadas sobre una superficie esférica. Por ejemplo, por medio de los meridianos y los paralelos. Los primeros son circunferencias de igual longitud y la de los segundos va-

ría de cero al máximo definido por la esfera. Los meridianos definen los llamados polos al cortarse en puntos opuestos, y el paralelo mayor se llama «ecuador». Un punto cualquiera sobre la superficie esférica, la de la Tierra por ejemplo, se define fijando un meridiano (el que pasa por el Observatorio de la Marina de San Fernando de Cádiz ha sido la referencia de los marinos españoles durante muchos años, y el que pasa por Greenwich lo fue primero para los pérfidos albios y después para muchos más) y recorriendo la esfera hasta llegar al punto a lo largo de los demás meridianos y paralelos. Los dos números se llaman latitud y longitud (véanse las figuras 2.2 y 2.3).

La inclinación de $23,5^\circ$ de la eclíptica o plano de la órbita también define los trópicos y los círculos Ártico y Antártico. El trópico de Cáncer es el círculo definido por los puntos donde el Sol incide perpendicularmente a la Tierra en verano, es decir, el paralelo correspondiente a $23,5^\circ$ de latitud. Lo mismo se define en el hemisferio sur en invierno, y entonces se llama trópico de Capricornio. Estos nombres provienen del alineamiento del Sol y la Tierra con esas constelaciones en los solsticios correspondientes. Los trópicos son los límites norte y sur de las zonas tropicales del planeta. Los círculos Ártico y Antártico también

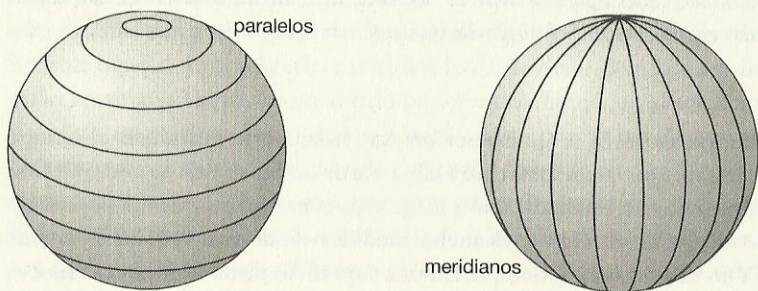


Figura 2.2. Los paralelos y los meridianos son líneas imaginarias para la definición de las coordenadas de los puntos de una esfera. Los primeros son de longitud variable y los segundos idénticas cuyos puntos de cruce definen los polos.

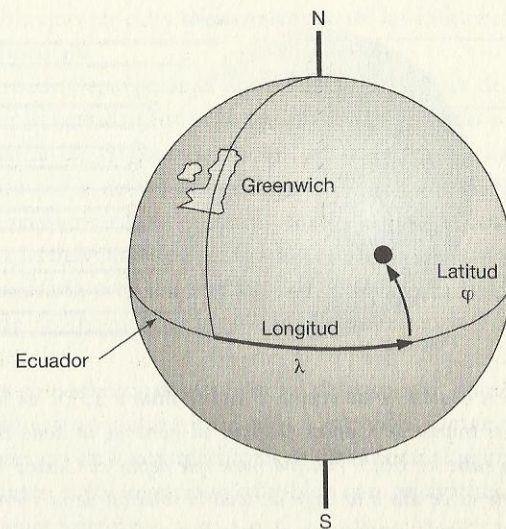


Figura 2.3. Tomando como referencia un meridiano cualquiera, por ejemplo el de Greenwich, y el paralelo mayor, el ecuador, se definen las coordenadas de un punto: la latitud φ y la longitud λ .

vienen definidos por los dichosos $23,5^\circ$: más hacia el norte o hacia el sur de ellos no llega la luz del Sol durante seis meses, así que son los paralelos de latitud norte o sur de $90^\circ - 23,5^\circ = 66,5^\circ$ (véase la figura 2.4).

Además de refrescar ciertas cosas que nos enseñaron en la escuela, hemos preparado el terreno para aprender cómo se apañó un griego culto e inteligente para averiguar el tamaño de la Tierra hace más de dos mil doscientos años.

Eratóstenes era de Cirene, capital de la Cirenaica, que en la actualidad está en Libia y se llama Shahhat. Nació en 273 a.C. en una familia rica, y gracias a ello pudo tener una educación exquisita en Atenas y una carrera magnífica en Alejandría, aunque, como después se vería, hizo méritos sobrados para merecer sus puestos y honores. A lo largo de toda su vida, que se prolongó hasta el año 194 a.C., fue amigo y ad-

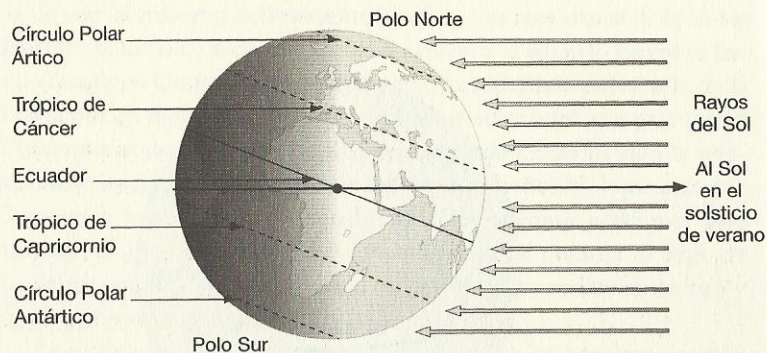


Figura 2.4. En el solsticio de verano, el Sol se sitúa a $23,5^\circ$ de latitud norte, lo que define el trópico de Cáncer, el límite al norte de la zona tropical. A la vez, en el área entre los $66,5^\circ$, latitud norte que define el Círculo Polar Ártico, y el Polo Norte es de día a lo largo de toda la rotación de la Tierra. Análogamente, entre el Círculo Antártico y el Polo Sur no se recibe luz solar alguna. Seis meses después, el Sol se sitúa sobre el trópico de Capricornio.

mirador de Arquímedes. Éste también profesaba un gran respeto a Eratóstenes, al que conoció durante su época de estudios en Alejandría. El carácter de uno era muy distinto al del otro: ya hemos visto que Arquímedes era un poco asilvestrado, y Eratóstenes era un aristócrata sensible y algo estirado. Sensible porque también era un buen poeta, ya que tuvo las enseñanzas privilegiadas (y particulares) de su paisano el gran Calímaco. Estirado porque suscitó tantas envidias que fue criticado con frecuencia y su reacción siempre fue altanera. Eratóstenes no sólo cultivó las matemáticas y la poesía, sino también la astronomía, la geografía y la filosofía, y por ello muchos le llamaban el «beta» queriendo decir que su destino era estar detrás de la alfa, o sea, ser aprendiz de todo y maestro de nada. En cambio, otros tantos le decían pentatlón por considerarlo campeón de cinco disciplinas aunque no fueran olímpicas. En cualquier caso, Eratóstenes fue el tercer director de la Biblioteca de Alejandría, el mayor centro científico y cultural del mundo. Para ser su

director había que ser muy sabio, y realmente las influencias e intrigas servían de poco allí.

No se puede dejar pasar la oportunidad de hablar de la Biblioteca de Alejandría, ciudad fundada por Alejandro Magno y capital de la última dinastía de faraones egipcios, los Ptolomeos. La biblioteca, que formaba parte de un maravilloso museo, contenía entre siete y ocho centenares de miles de rollos equivalentes a unos cien mil libros. Pero, aún más notable que su existencia, lo esencial de la Biblioteca de Alejandría para las generaciones posteriores fue su desaparición, una de las mayores ignominias jamás cometida por el hombre contra el hombre.

Hay tres sospechosos de cometer tal desaguisado: Julio César, el patriarca Teófilo (y su patrón Teodosio) y el califa Omar de Damasco. Hoy, la tendencia de los historiadores es considerar al primero culpable con atenuantes, a los segundos culpables con agravantes y al tercero completamente inocente.

Julio César andaba por Alejandría entre el 48 y el 47 a.C., en su guerra contra Pompeyo. Allí estaba, nada menos, que con Cleopatra VII. Alojado en su casa, no es de extrañar que Julio César no se diera cuenta de que una flota enemiga estaba desembarcando con muy malas intenciones. Un sálvese quien pueda organizado por un estratega tan grande como Julio César no podía sino ser complejo y tener éxito. Pero para salir airoso del trance tuvo que incendiar la mitad de la ciudad. Y la biblioteca, aunque era de piedra, se resintió. ¿Hasta qué punto? No lo sabemos, porque el propio César se guardó mucho de mencionar tan lamentable pérdida en sus crónicas y a los otros cronistas, como Hirtius, que dejó magníficas descripciones de aquellas campañas, ni se les pasó por la cabeza contrariar al emperador con el enojoso asunto de la biblioteca. La circunstancia atenuante de Julio César no es que para salvar su vida y la de los suyos fuera lógico que incendiara lo que fuese menester, no, sino que más adelante compensó a Cleopatra con 200.000 rollos de Pérgamo (desvestir a un santo para vestir a otro) donados a través de un magnífico intermediario: Marco Antonio. Es un atenuante, pero en buena medida también una prueba de su culpabili-

dad. De todas maneras, hay historiadores que niegan cualquier responsabilidad de César.

Cuatrocientos años después, en concreto en 391 d.C., un decreto del muy pío emperador Teodosio provocó escalofríos a las personas cultas: prohibía todas las religiones paganas, o sea, las no cristianas. La Biblioteca de Alejandría, cuyo obispo era Teófilo, y el Serapio, el museo del que formaba parte la biblioteca, qué otra cosa podían ser sino el templo de alguna doctrina pagana. Todo fue arrojado al fuego purificador. También hay historiadores que dudan de esta versión, pero creo que son los menos.

De lo que parece que no hay ninguna duda es de la inocencia del último acusado: el califa Omar. Cuando los árabes llegaron a Alejandría después de la conquista total de Egipto corría el año 642. Infinidad de testimonios indican que la biblioteca había desaparecido hacía más de doscientos años. A Omar se le acusó de haber hecho repartir los rollos de la biblioteca entre la población para que se calentaran. Quedó escrito que tuvieron combustible para seis meses. Todo era tan falso que no salían ni las cuentas más elementales, teniendo en cuenta que el invierno allí no llega ni a seis semanas.

El caso es que en pleno esplendor de la Biblioteca de Alejandría el gran Ptolomeo Evergetes nombró a Eratóstenes su director, cargo que ocupó durante cuarenta y un años. Hay que decir que mientras que de Arquímedes nos ha llegado numeroso material fiable, incluso manuscritos, de Eratóstenes, por razones obvias, no es así. En concreto, la medida de la circunferencia terrestre que vamos a describir la recogía su obra *Geografiká*, de la que apenas se salvaron unos pocos fragmentos. La referencia usual es de los escritos de Kleomedes, *De motu circulari*, que datan de doscientos años después de la época de Eratóstenes pero son fiables, aunque queda el misterio de la longitud exacta de un estadio. Pasemos a la explicación de la bella experiencia de Eratóstenes.

No sólo él, sino infinidad de gente, tenía noticia de un hecho notable que tenía lugar periódicamente en una ciudad llamada Siena que hoy día se conoce como Asuán, la de la grandiosa presa egipcia. Suce-

día que cierto día del año, al mediodía, los obeliscos y las columnas lisas que había por doquier no producían sombra. Aún más notable era que el agua de los pozos reflejaba como un espejo la luz del Sol. Como tal día presagiaba el verano, los lugareños hacían fiestas tan bullangueras que el prodigio cobró fama.

Lo que entendemos hoy es que los rayos del Sol incidían en Asuán en el instante preciso del solsticio de verano apuntando directamente al centro de la Tierra. Porque una columna bien aplomada y un pozo bien construido definen la dirección del centro del planeta, ¿no es así? Piense el lector que Asuán debe estar justo sobre el trópico de Cáncer, según la definición anterior. En realidad está a muy poco más de 24 grados norte en lugar de 23,5 grados, pero en aquella época esta diferencia era casi inapreciable.

Eratóstenes era también geógrafo y quien mejor tenía dibujado el mundo conocido. Sus mapas eran muy apreciados por los jefes de las caravanas y los navegantes. Charlando un día, me imagino yo, con algunos colegas sobre la divertida fiesta anual de Asuán, le entró la curiosidad de por dónde quedaba tal ciudad. Por la noche consultó sus propios mapas y, puesto que el Nilo va bastante recto desde el nacimiento hasta su desembocadura en la ciudad mediterránea de Alejandría, ésta podría hallarse en el mismo meridiano que Asuán. Lamentablemente no lo estaba... pero casi.

Entonces, cada vez más alborozado, Eratóstenes se dijo: si el Sol estuviera tan lejos como para que se pueda considerar que todos sus rayos inciden paralelamente sobre la Tierra, se podría calcular el tamaño de ésta simplemente midiendo la sombra que produce una columna allí mismo, en Alejandría, el mediodía del día de la fiesta de Asuán.

Naturalmente, el culto y circunspecto Eratóstenes no salió de la biblioteca gritando «¡Eureka!», y menos tan desnudo como le habían contado que había hecho su amigo Arquímedes por las calles de Siracusa, pero la sonrisa le duró mucho tiempo, hasta que una nube de preocupación ensombreció su rostro. ¿Cómo demonios iba a averiguar la distancia exacta entre Asuán y Alejandría? Porque sin ese dato no había nada que hacer. De sus mapas no se fiaba, porque la exactitud tenía que ser mu-

cho mayor que con la que él se conformaba al elaborarlos. ¡Ya está! Las caravanas.

A lo largo del año siguiente, casi todos los jefes de caravanas que hacían el recorrido a lo largo del Nilo tenían una extraña misión ordenada (y pagada de su propio pecunio) por el ilustre director de la Biblioteca de Alejandría: debían medir por separado la distancia entre las dos ciudades. Para ello tendrían que poner esclavos a contar las vueltas de rueda que daban los carros, a extender largas cuerdas a lo largo de todo el camino, a contar pasos, etc. Estamos hablando de más de setecientos kilómetros en línea recta, sin tener en cuenta los accidentes del terreno.

Cuando se acercaba el verano y ya habían regresado muchas caravanas, Eratóstenes dio por buena la distancia de 5.000 estadios entre las dos ciudades. Llegó el día de la conocida fiesta de Asuán y Eratóstenes, lleno de inquietud e impaciencia, midió el ángulo que marcaba la sombra de un palo colocado perfectamente vertical en los jardines de la biblioteca justo cuando el Sol estaba en su punto más alto. Concluyó que era la cincuentava parte de un giro completo ($7,2^\circ$). La circunferencia de la Tierra tenía que estar en la misma proporción respecto a la distancia entre Asuán y Alejandría: 50 veces 5.000, o sea, 250.000 estadios (véase la figura 2.5).

Antes de ver hasta qué punto estuvo acertado Eratóstenes hay que saber a qué distancia equivale un estadio. He hecho una exploración exhaustiva en Internet, y el mejor trabajo que he encontrado sobre el asunto es de un brasileño llamado J. F. Porto da Silveira. El estadio usado por Eratóstenes, según cuenta Plinio en su *Historia natural*, equivalía a $\frac{1}{40}$ schoinos egipcios. Un schoino daba 12.000 covados reales egipcios, y en varios museos actuales se puede verificar que uno de esos covados equivale a 0,525 metros. Conclusión: un estadio de Eratóstenes equivalía a 157,5 metros. Esto da una circunferencia para la Tierra de... ¡39.375 km! Esto implica un 1,5 por ciento de error.

Los errores de Eratóstenes fueron muy sutiles y casi inevitables. Por ejemplo, la distancia entre Asuán y Alejandría es 729 km, o sea, 4.628 estadios en lugar de 5.000. Como se ha dicho, las dos ciudades no están

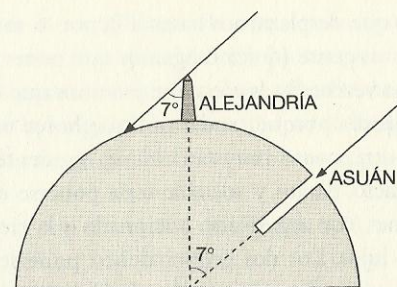


Figura 2.5. Esquema de los ángulos que forman los rayos de Sol sobre un pozo de Asuán y un obelisco de Alejandría en el solsticio de verano.

en el mismo meridiano, sino que difieren en unos 3° de longitud. El ángulo de la sombra tampoco fue muy preciso porque usó $7,2^\circ$ y una medida más exacta daría $7^\circ 5'$, o sea, $7,08^\circ$. Cometió algunas inexactitudes más que a lo mejor hasta se compensaron, pero sin duda su labor de medición fue impresionante. Muchos siglos después, Colón quería convencer a frailes cultos y cartógrafos experimentados que el radio de la Tierra era mucho menor que el calculado por Eratóstenes.

Hay un dicho, creo que de Confucio, que reza más o menos así:

Me lo contaron y lo olvidé.

Lo vi y lo creí.

Lo hice y lo aprendí.

Voy a proponerle al lector que mida la circunferencia de la Tierra para comprobar si es capaz de superar a Eratóstenes en exactitud. Hacerlo con sus hijos será más divertido e instructivo.

Lo primero que hay que hacer es elegir un pueblo o ciudad que diste varios cientos de kilómetros de la nuestra y que esté rigurosamente en el mismo meridiano, y para ello necesitamos un buen mapa. Con esta elección empieza la diversión, porque entre las distintas opciones que se presenten tendremos que elegir una, ya sea por lo bonito del paisaje (a

lo mejor tenemos que desplazarnos hasta allí), por lo simpática que sospechemos que sea su gente (quizá tengamos que ponernos en contacto con ellos), etc. Una vez hecha la elección, tenemos que decidir si vamos a ir hasta allí y cuándo, porque tendremos que hacer una medición en nuestro pueblo y otra, como muy tarde al día siguiente, en el otro. Lo más apropiado, exacto, barato y sociable sería ponerse en contacto, por ejemplo vía Internet, con algún otro aficionado a la ciencia del pueblo elegido y con sus hijos. Los dos grupos deben ponerse de acuerdo en medir exactamente a la misma hora la longitud de la sombra de una regla larga o un tubo recto o lo que sea, siempre que su longitud se mida muy bien. Conviene que las dos barras sean igual de largas, aunque no es del todo necesario. Lo que sí es absolutamente imprescindible es que las dos barras estén perfectamente verticales. Para ello se puede usar una plomada de albañil (o una casera que funcione bien) o un nivel.

Obsérvese bien el esquema siguiente.

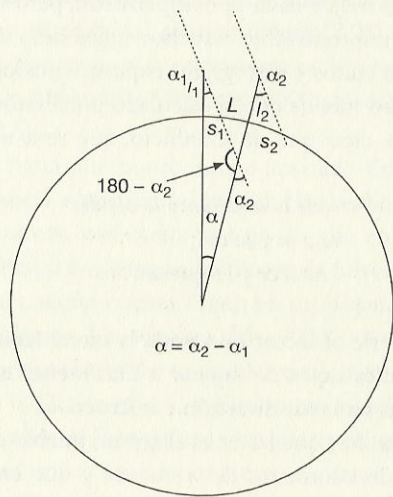


Figura 2.6. Igual que la figura 2.5 pero con dos listones de longitudes l_1 y l_2 situados en dos puntos cualesquiera del mismo meridiano.

Si recordamos la matemática elemental, estaremos de acuerdo en que los ángulos entre los rayos del Sol y las barras en uno y otro lugar vienen definidos por sus tangentes, cuyos valores pueden calcularse por el cociente entre la longitud de la sombra s y la longitud de la barra l ; distinguiremos las de un pueblo y las de otro con un 1 y un 2. O sea:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = s_1/l_1 \quad \text{y} \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = s_2/l_2$$

Con una calculadora hallamos el arco cuya tangente es el cociente anterior. Con ayuda del gráfico, cuya interpretación es obvia, conveniremos que:

$$\alpha_1 + 180 - \alpha_2 + \alpha = 180, \text{ o sea: } \alpha_1 - \alpha_2 + \alpha = 0, \text{ o sea: } \alpha = \alpha_2 - \alpha_1$$

Con esta α y la distancia D entre los dos pueblos, que calculamos en el mapa, ya sólo nos resta hacer una simple regla de tres:

$$\begin{array}{r} \alpha \text{ ————— } L \\ 360 \text{ ————— } x \end{array}$$

es decir:

$$x = 360 \times L / \alpha$$

Les deseo mucha suerte. Además, les ruego que, cuando terminen y se den por satisfechos, recuerden al gran Eratóstenes y sonrían complacidos celebrando que hace tantos siglos consiguiera llevar a cabo una medición tan compleja con tanta precisión.

Por cierto, el aristocrático Eratóstenes murió en 194 a.C. de una forma que sólo está al alcance de gente con mucha clase: en cuanto se vio medio ciego y desvalido, se dejó morir de inanición. Sublime.

Galileo

La caída libre de los cuerpos

Es comúnmente aceptado que Galileo fue el descubridor del método científico. Hasta tal punto esto es correcto que inventó incluso los aspectos más controvertidos de dicho método. La potencia del método es tanta que la ciencia, y su hija la tecnología, han dominado el mundo y no se entrevé alternativa clara para la civilización como no sea la barbarie, la mística o el misticismo bárbaro. ¿Qué hizo en realidad Galileo? Infinidad de cosas, pero fundamentalmente desenmascarar a Aristóteles. Pero vayamos poco a poco.

Vincenzo Galilei era un hombre notable de Pisa. Para lo que viene después en este capítulo, conviene hablar de las actividades del padre de Galileo. Era un laudista, o sea, un virtuoso del laúd, y además un excelente cantante, pero se ganaba la vida enseñando música y componiendo bellas canciones. No le iba nada mal económicamente, porque además estaba casado con la bella y simpática Giulia degli Ammannati, una rica dama de Pescia. El 15 de febrero de 1564 la feliz pareja tuvo un hermoso varón al que llamaron Galileo. El bautizo, como no podía ser de otra forma, se celebró en la catedral. Don Vincenzo y doña Giulia tuvieron nada menos que seis hijos más.

Curiosamente, don Vincenzo Galilei dedicaba la mayor parte de su tiempo a teorizar sobre la música. Esto significa que trataba de encontrar relaciones, llamémosle, por qué no, matemáticas en la estructura musical y en los instrumentos musicales. Traducía a números experiencias como la de tocar una canción, y al revés, de los experimentos extraía conclusiones matemáticas.

Diez años después del nacimiento de Galileo, sus padres se mudaron a Florencia, puesto que la combinación de teoría y práctica musical de don Vincenzo atraía a muchos hombres poderosos y cultos. Por ejemplo, la familia Galilei estuvo a punto de irse a Munich porque el duque Albrecht de Bavaria ofreció a don Vincenzo un buen estipendio para establecerse allí.

Cuando el joven Galileo tenía quince años le dio por internarse en el monasterio de Santa Maria di Vallombrosa. Poco más de tres meses tardó en percatarse de que Dios no lo había llamado por la senda clerical. Don Vincenzo se puso muy contento, porque aquello del monasterio no le había gustado mucho, y trató de convencer a su hijo para que se hiciera médico en la Universidad de Pisa, que tan bien conocían. El joven dijo que nada de eso, y se matriculó en «Arte». Que el niño haga lo que quiera, pensó don Vincenzo. Galileo regresó a Florencia cuatro años más tarde, con los veintiuno ya cumplidos, y sin título universitario de ninguna clase. A ver qué hace don Vincenzo con semejante zascandil. Por lo menos echarle una bronca en condiciones. Estando en ello, Galileo le contó cosas a su padre que lo dejaron pasmado. Le dijo que Ostilio Ricci, el gran matemático de la corte, lo había medio apadrinado y le había enseñado todas las matemáticas de Euclides. No está mal, aceptó don Vincenzo. Además, continuó el joven, estando un día observando las oscilaciones de una lámpara en la catedral de Pisa (o sea, pensando en las musarañas, concluye su padre) observó el isocronismo del péndulo, es decir, que siempre tardaba exactamente el mismo tiempo en dar una oscilación completa. «¿Y cómo mediste el ritmo?» «¡Contando mis pulsaciones!» Como don Vincenzo no dejaba de fruncir el ceño y seguía casi tan hosco como al principio, Galileo le dijo, con expresión misteriosa, que había decidido abandonar a Aristóteles y seguir a Arquímedes. Don Vincenzo se quedó un momento en silencio y luego le espetó que qué quería decir con eso. El joven Galileo le replicó triunfante: «La bilancetta, babbo, la bilancetta!». Ante el pasmo escamado de don Vincenzo, el joven le pidió que esperara y al rato regresó con un artilugio que lo dejó maravillado: la balanza hidrostática. Don Vincenzo llevaba más de dos años tratando de encon-

trar regularidades entre tensión y longitud de una cuerda y las consonancias en una octava musical, y entonces llega su hijo y le muestra la sincronía del péndulo y una balanza sin resortes ni muelles, sólo con agua fresca. Y de una precisión superior a las que él conocía. ¡A lo mejor Galileo no era tan mal estudiante como parecía! Vamos a ver si es pabila o no, concluyó don Vincenzo.

Galileo era listo, y como sabía que lo era, también era ambicioso. No dejó de solicitar plaza en las mejores universidades –Siena, Padua y Bolonia– y, naturalmente (no tenía publicaciones ni citas), se la denegaron una y otra vez. No le quedó más remedio que dar clases particulares para no sangrar demasiado a don Vincenzo.

Consideró que el cálculo del centro de gravedad de los objetos, tal como lo había planteado Arquímedes, se podía mejorar mucho. Lo consiguió, pero como aquello no le iba a proporcionar fama ni honores tuvo la feliz idea de dar dos conferencias en la Accademia Fiorentina. El tema que había elegido era tan espectacular que no se lo pudieron negar: «Sobre la forma, localización y dimensiones del *Inferno* de Dante». Casi nada. Tuvo éxito, pero no tanto como para que aquel despropósito le abriera las puertas de la Universidad de Florencia. Más bien todo lo contrario, porque seguro que algún santo varón entornó un ojo más que otro, lleno de suspicacia ante tamaño dislate con inconfundible tufo a herejía.

A los veinticinco años, gracias a los amigos que había hecho en Pisa, a Galileo le concedieron la ansiada plaza para enseñar matemáticas en la universidad donde había estudiado. Aunque su principal tutor había sido nada menos que el marqués Guidobaldo del Monte, el salario que le ofrecieron fue de 160 escudos al año, una bagatela que si no llega a ser por don Vincenzo...

Durante los cinco años que estuvo en Pisa, profundizando en los enfoques que Arquímedes había dado al movimiento, Galileo escribió *De motu*, «Sobre el movimiento», la obra decisiva de su vida que, por cierto, nunca publicó. Con ella empezó su profunda revisión de Aristóteles.

Parece ser que lo que viene a continuación es más leyenda que realidad, pero se ajusta tan bien al carácter del joven Galileo que merece ser verídico, y quizá incluso lo es. Los historiadores no se ponen de

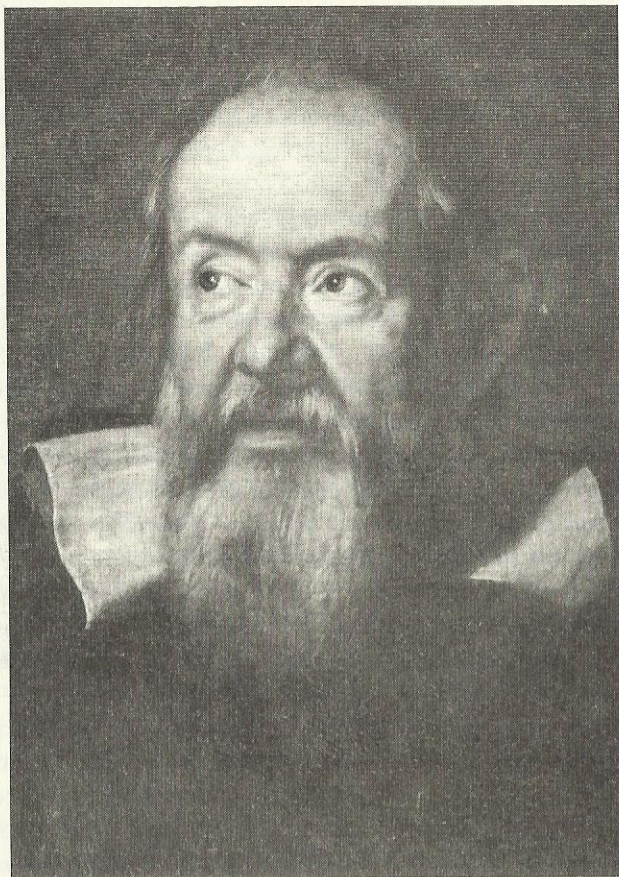


Figura 3.1. Galileo Galilei (1564-1642).

acuerdo. La verdad es que no queda documentación del asunto, aunque debió de existir. El caso es que Galileo convocó por escrito a toda la comunidad universitaria al pie de la famosa torre de Pisa, ya muy inclinada por aquella época. ¡Por primera vez en dos mil años se iba a de-

mostrar (demostrar, sí) que Aristóteles se había equivocado! ¿Quién iba a faltar a semejante convocatoria? Allí estaban todos los jaraneros estudiantes y los adustos profesores, sobre todo los de filosofía, que además eran mayoría.

Galileo, desde el primer piso de la torre y con tres bolsas llenas de bolas de plomo, explicó a voz en grito que Aristóteles, haciendo uso de conceptos causales y cosas así, había establecido que la velocidad de caída de los cuerpos era proporcional a su peso. «¡Observen, señores! En esta bolsa hay bolas de plomo de distintos tamaños, o sea, de pesos muy diferentes. En esta otra también hay bolas de plomo, pero todas iguales; y en esta última, bolas de madera del mismo tamaño que las otras. Todo ello podrán comprobarlo recogiendo las bolas ahí abajo, porque las voy a tirar de dos en dos desde lo alto de la torre. ¡Sostengo que todas llegarán al suelo al mismo tiempo!» La multitud estaba expectante. En cuanto Galileo llegó al último piso de la incierta torre, gritó sin pararse a recobrar el resuello: «¡Ahí van!».

La cosa no funcionó porque las bolas no llegaban abajo todas a la vez, pero, a pesar de las cuchufletas de los estudiantes más descarados, para muchos, sobre todo para los profesores, quedó claro que el aserto de Aristóteles era falso porque la diferencia con la que llegaban las bolas al suelo era muchísimo menor que la proporcionalidad que predecía el griego. Hoy sabemos que esa pequeña diferencia se debía a la resistencia del aire, que depende del volumen (o, más bien, de la forma) y del peso, pero en el vacío un elefante y una hormiga caerían exactamente a la misma velocidad.

A Galileo, para sorpresa de nadie, no le renovaron el contrato en la Universidad de Pisa. Para colmo, don Vincenzo murió ese mismo año. Pero no hay mal que por bien no venga: la herencia de su padre fue considerable, y Galileo supo que había quedado vacante una plaza de profesor de matemáticas en la prestigiosa Universidad de Padua, en la misma República veneciana. El salario era también de ciento sesenta al año, pero ahora eran ducados en lugar de escudos: se trataba de una cantidad considerable, porque cada ducado equivalía a unos once escudos.

Galileo consiguió la plaza por seguir cabalmente el consejo que le dieron sus amigos: tenía que ser encantador con sus examinadores. Hasta tal punto hizo bien su papel que el mismísimo Senado de la República lo felicitó. Tal era su euforia que, por lo visto, dio una lección inaugural que causó sensación. Una característica notable de Galileo en este sentido era su gran capacidad para la oratoria y el dominio perfecto que tenía de la lengua italiana. En latín discutía con cualquier sabio, pero exponer en foros amplios sus ideas en italiano siempre le ayudó a ser conocido, incluso entre el pueblo llano.

En el ambiente intelectual y sobre todo aristocrático de Padua y Venecia Galileo se sentía como pez en el agua. Su carácter desenvuelto, irónico (incluso sarcástico) y polemizador hizo que pronto fuera invitado obligado de todos los salones de palacios y palacetes. Pronto hizo dos descubrimientos sorprendentes y decisivos en su vida: $s = gt^2/2$ y Marina Gamba. De lo primero hablaremos largo y tendido porque es el objetivo final de este capítulo. Lo segundo se refiere a que el enardecido joven contrató a una criada que lo encandiló. Lo curioso es que, siendo Galileo amante de la cultura y el medro en la alta sociedad, Marina Gamba era una mujerona de carácter borrascoso, saludable, robusta y analfabeta. Ésta fue la que entendió de verdad al arrogante e insigne profesor de matemáticas de la eximia Universidad de Padua. Marina le dio tres hijos: Virginia, Livia y Vincenzo. Sólo por haberle dado a Virginia, Galileo estuvo agradecido a Marina toda su vida, sobre todo cuando cayó en la desgracia que el lector intuye desde hace rato.

Galileo, en medio de su intensa actividad investigadora, no dejó de cultivar dos aficiones: amasar dinero y estudiar a Arquímedes. Daba clases privadas a jóvenes nobles no sólo de matemáticas, sino de fortificación, artillería y mecánica. Incluso inventó una bomba para subir agua accionada por caballos, con la que trató de superar, sin conseguirlo, al tornillo de Arquímedes, que aún se utiliza hoy día no sólo para subir agua, sino también para subir granos de cereal en los silos. Además de cobrar caras sus clases, ideó una forma de ganar más dinero: escribir manuales de instrucciones muy ilustrados y bien impresos que vendía a sus propios estudiantes.

Después inventó el sector, que eran dos reglas graduadas con varias escalas que, conectadas por un punto del cual también podía colgar una plomada, permitía calcular diferentes magnitudes de interés mecánico y militar. El sector, junto al manual que explicaba su utilización, tuvo tanto éxito que Galileo no daba abasto para fabricar todos los que le pedían. Así, contrató a Marco Antonio Mazzoleni, un artesano. Unió, tímidamente pero por primera vez en la historia, los mundos de la ciencia y la empresa.

Aparte de estos aspectos en cierto modo más frívolos de su actividad, Galileo dio muestra de la inmensidad de su ingenio y perspicacia para la auténtica ciencia tratando de explicar las mareas en base a los movimientos diurnos y anuales de la Tierra: llegó a la conclusión de que el maldito sistema copernicano, en el que es la Tierra la que gira alrededor del Sol y no al revés, era correcto. Corría el año 1596. Cuatro años más tarde, justo en 1600, cuando Galileo estaba en todo su esplendor padovano, le llegó la noticia que le hizo segregar y tragar saliva descontroladamente: Giordano Bruno, por diversos motivos entre los cuales estaba su apoyo a Copérnico, había sido quemado vivo en Roma con la lengua clavada a un palo para que no pudiera hablar y después de sufrir espantosas torturas durante años. Mejor dedicarse a la caída de bolas por planos inclinados, los péndulos, los sectores y otros cachivaches inocentes, amén de ganar dinero, que nunca estaba mal visto.

Se pueden poner muchos ejemplos de lo que Galileo consiguió en estas actividades. El movimiento del péndulo, que le había fascinado desde su juventud, lo estudió hasta concluir que, si el ángulo de oscilación era menor a 15 grados, el periodo era prácticamente independiente del peso oscilante y dependía sólo de la longitud del hilo. Con un médico amigo suyo, Santorio, aplicó aquellos conocimientos a fabricar el *pulsilogium*, un péndulo que servía para tomar las pulsaciones de los pacientes. También construyó un termómetro muy primitivo que llamaba «termoscopio». Con otro amigo llamado Sagredo (obsérvese que Galileo también inventa el trabajo en colaboración, que hoy día es casi la única manera de investigar en el mundo de la ciencia)

montó en un artilugio un peñasco de magnetita de poco más de kilo y medio, formando un imán que era capaz de levantar una bola de hierro de casi cuatro kilos de peso. ¿Para qué podría servir aquello? Ni idea, salvo quizá... ¡para ganar dinero! Trataron de vendérselo al gran duque Fernando de Medici, pero sin éxito. Después intentaron vendérselo a algunos nobles para que lo utilizaran como regalo de boda de Cosimo de Medici. ¡Qué gran símbolo de atracción y fuerza para un matrimonio! Tampoco lo consiguieron, así que Galileo pasó de largo por el magnetismo.

Trabajando con balanzas hidrostáticas, movimientos acelerados, trayectorias parabólicas de proyectiles, resistencia de materiales, etc., por las noches Galileo se quedaba embobado mirando al cielo. Había aparecido una nueva estrella. ¡Qué belleza, Señor! Pero cuidado con el descubrimiento: ¿no enseña la Santa Madre Iglesia, basada en Aristóteles, que los cielos son no sólo infinitos, sino también inmutables? Las perturbaciones celestes son ensoñaciones de los que no temen a Dios. La nueva estrella no era más que un nubecilla alta iluminada por el Sol.

Lo que había aparecido en el cielo era una supernova, final explosivo de una estrella vieja de gran masa. Una explosión de este tipo ocurre en cada galaxia cada veinticinco o treinta años como promedio. Para los lapsos de tiempo que se manejan en astronomía, se trata de un ritmo endiablado, casi como los flashes de las cámaras de fotos en los estadios cuando se consigue algún resultado deportivo ansiado. Una supernova puede tener la luminosidad de una galaxia completa, y una galaxia completa está formada por unos cien mil millones de estrellas. Ha leído bien el lector. Aquella supernova de 1604 fue la muerte de una estrella grandiosa no sólo perteneciente a nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, sino bastante cercana. No es frecuente observar este tipo de fenómenos porque estamos situados en un extremo de la galaxia y la densidad de estrellas y polvo interestelar nos impiden ver todos los que se producen, pero aquella se veía tan bien porque (en términos relativos) estaba muy cerca.

En las noches despejadas, todo el mundo se quedaba embelesado por la nueva estrella. Pero Galileo no se podía conformar con deleitarse

mirando, sino también calculando. Midiendo el paralaje de la supernova dedujo que, sin lugar a dudas, estaba más allá de la Luna. No era cierto que los cielos son inmutables.

Galileo continuó unos años dedicado a lo suyo, pero el placer que le dio escudriñar el cielo no se le había olvidado. En 1609 le llegó la noticia de que los holandeses habían inventado un instrumento que permitía ver objetos distantes mucho más cerca. ¡Aquella era una oportunidad de oro! Literalmente de oro, pensó Galileo, porque, por lo que hizo después, su afán por conseguir un telescopio era monetario, aunque después su genio arrollara la ambición como las olas de las playas hacen con la arena.

En cuanto Galileo fabricó su primer telescopio de tres aumentos y vio que la cosa era factible, construyó uno de ocho aumentos e inmediatamente solicitó presentarlo ante el Senado de la *Serenissima* República de Venecia. El Senado aceptó y Galileo se las ingenió (y pagó) para que la ceremonia fuera más pomposa que una simple sesión del magno foro. Tuvo éxito, un éxito grandioso que se tradujo en que el propio dogo de la República, Niccolò Contarini, hizo un discurso espléndido alabando el genio de Galileo y el florecimiento de Padua. En cuanto se acallaron los aplausos se cumplieron sus anhelos: el dogo concedía doblarle el salario, y su plaza en la universidad sería vitalicia. Los murmullos y gestos de aprobación en la sala fueron unánimes... o casi, pues en realidad Galileo estaba muy disgustado porque esperaba más, mucho más de su fantástico telescopio.

Se fue a su casa y, sentado ante una ventana con el tubo en las manos, dio rienda suelta a su indignación. Tardó tanto en calmarse que se hizo de noche. Al cabo, Galileo resopló, diciéndose: «En fin, si este aparato no da para más provecho, que sirva por lo menos para distraerme». Y dirigió el telescopio a la Luna. Entonces comenzó tal voráGINE de descubrimientos que bien podía decirse que pocas veces un hombre consiguió tanto con tan pocos medios (véase la figura 3.2).

Galileo descubrió montañas en la Luna, manchas en el Sol, el anillo de Saturno, cuatro lunas alrededor de Júpiter, las fases de Venus e incluso sospechó que algunas estrellas que veía estaban en fase de for-

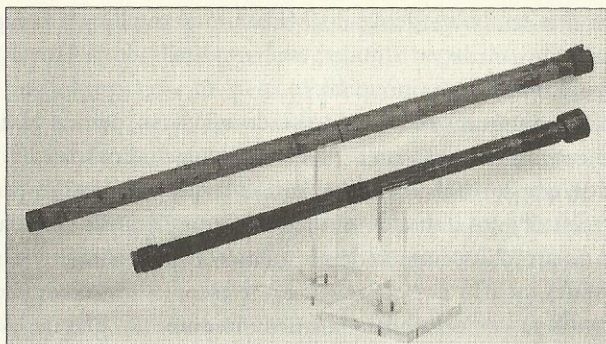


Figura 3.2. Dos telescopios de Galileo que se conservan en el museo de Florencia.

mación. Tan maravillosos fueron los descubrimientos de Galileo que escribió un libro llamado *Sidereus Nuncius*, «El mensajero de las estrellas», que dedicó a Cosimo II, gran duque de la Toscana. Ya antes a los satélites de Júpiter les había llamado Estrellas Mediceas, a ver si caía algo.

El libro se hizo famoso en toda Europa. El uso del telescopio se extendió e infinidad de sabios confirmaron las observaciones de Galileo; en particular, la existencia de las cuatro lunas de Júpiter.

Cosimo de Medici quedó impresionado por aquel éxito. Le ofreció a Galileo un puesto en la Universidad de Florencia con un salario igual al del más alto funcionario de la corte, ningún compromiso docente (ni de ninguna clase) y el título de matemático y filósofo mayor del gran duque de la Toscana. Y todo ello de por vida. *Ciao*, Padua, *ciao* Venecia. Galileo se marchó a la Toscana, dejando en el Véneto más envidia y resentimiento que amistad y admiración.

En Florencia, ciudad donde pasó toda su infancia y adolescencia, Galileo fue otra vez feliz. Construyó nuevos telescopios y refutó o confirmó las conclusiones de infinidad de observadores de toda Europa. Los más notables, como el gran Johannes Kepler, confirmaron los prin-

cipales descubrimientos del toscano. Aquello era la gloria, aunque con alguna sombra. Su relación con Marina Gamba se había deteriorado, y ambos prefirieron vivir separados, al menos durante unos años. La mujer permanecería en Padua con los niños. Aquello no le gustaba a Galileo porque consideraba pernicioso la influencia de Marina en sus hijos, pero el carácter de aquella mujer era demasiado fuerte para andar discutiéndole derechos maternos. El arreglo que encontró Galileo no fue muy acorde con su brillantez. Vincenzo, el hijo menor, de apenas cuatro años, se quedaría con la madre, pero sus dos maravillosas hijas, Virginia y Livia, entrarían en un convento de por vida. Esto último le costó varios años conseguirlo, porque las dos niñas eran tan jóvenes que necesitaban una dispensa especial para ello.

¿Qué le faltaba por conseguir en la vida a Galileo? Conquistar Roma, o sea, poner el Vaticano a sus pies, rendido ante la majestad de su obra, sobre todo lo concerniente a los cielos, para mayor gloria de Dios. La Santa Madre Iglesia Católica Apostólica y Romana ensalzaría a Galileo hasta las más altas cumbres jamás escaladas por ningún sabio. Pobre Galileo; en otros lugares le habrían advertido de lo que podía suponer topar con la Iglesia. ¿En tan sólo once años había olvidado lo que le había sucedido a Giordano Bruno?

No lo había olvidado, ni mucho menos, pero Galileo estaba convencido de que el copernicanismo del desdichado Bruno no había podido ser uno de los cargos importantes de su condena. Por lo pronto, muchos griegos, e incluso Ptolomeo, habían dicho que el Sol era el centro en torno al cual giraba todo, y desde el siglo II la Iglesia había tenido tiempo para hacerse a la idea. De hecho, el llamado sistema ptolemaico, en el que la Tierra estaba fija y el Sol giraba en torno a ella, había sido elaborado por los discípulos poco aventajados del gran egipcio por conveniencia matemática, no por convencimiento, y eso la Iglesia debía de saberlo. A Copérnico no le habían hecho nada, aunque es cierto que no había publicado su obra, escrita hacía muchos años, hasta el mismo año de su muerte. Además, la Iglesia es cualquier cosa menos tonta: ¿cómo se van a entender las fases de Venus si no es admitiendo que gira en torno al Sol? ¿No es obvio que al girar las lunas de Júpiter

en torno a él hace del todo plausible que los demás planetas giren en torno al Sol? ¿Y la sucesión de mareas conforme gira la Luna y a lo largo del año? Las Escrituras no tienen por qué acertar siempre. Sin ir más lejos, el Sol y la Luna no son quintaesencialmente perfectos porque tienen manchas, cráteres, montañas y demás. No hay más que observarlos con el telescopio.

El 29 de marzo del año del Señor de 1611, Galileo llegó a Roma en visita oficial ordenada por el secretario de Estado del gran duque de la Toscana. Aquello, como ya era costumbre en la vida de Galileo, fue un éxito apoteósico.

Por lo pronto, el mismísimo Papa, el severo y autoritario Paulo V, lo recibió a la primera solicitud y no sólo lo bendijo, sino que además le dio todo su apoyo. Cuando a Galileo se le fue pasando la euforia que le causó el magno encuentro, concluyó que, al fin y al cabo, no había recibido más que buenas palabras del Papa. Aquello no era conquistar Roma. Decidió solicitar al cardenal Roberto Bellarmino, la máxima autoridad intelectual de la Iglesia, el reconocimiento certificado de sus descubrimientos. Al fin y al cabo, los jesuitas tedescos Christoph Scheiner y Johann Baptista Cysat le habían hecho llegar sus observaciones sobre las manchas del Sol. Bellarmino era el jesuita jefe del Sacro Colegio Romano y su respaldo era seguro, así como fundamental para las ambiciones de Galileo.

La respuesta del insigne jesuita no se hizo esperar: el Colegio Romano certificó los descubrimientos celestes de Galileo Galilei. Pero el santo varón añadía: «aunque no está necesariamente de acuerdo con su interpretación de estos descubrimientos». No pasaba nada: la Iglesia certificaba por escrito los más maravillosos descubrimientos del cielo hechos jamás. A Galileo no le restaba por hacer en Roma más que disfrutar de su éxito y recuperar fuerzas para el viaje de vuelta a Florencia.

El primer gran banquete al que le invitaron estaba organizado por un inquietante personaje: el príncipe Federico Cesi. Galileo, naturalmente, aceptó encantado. Allí descubrió que el aristócrata era el fundador y sostenedor de una sociedad secreta llamada Accademia dei Lincei, formada por jóvenes radicales de la clase alta amantes de la filosofía,

la matemática y la observación de la naturaleza. Magnífico, pero ¿por qué secreta? El nombre de lince le sonaba muy bien a Galileo: vista escrutadora e implacable con el adversario, y le satisfizo que en aquel banquete él fuera considerado el invitado de honor. ¿Cómo se iba a negar a ser admitido en tan selecta sociedad?

Cuando a Galileo se le pasó la resaca, la inquietud que le habían provocado los lince volvió con renovados bríos, pero recibió otra invitación que le llenó de alegría y le hizo olvidar el extraño banquete: era del mismísimo Roberto Bellarmino, que le rogaba que asistiera a una cena en su honor con todos los matemáticos del Colegio Romano. Antes del fausto ágape, el eximio Odo van Maelcote daría una conferencia sobre los descubrimientos de Galileo. Aquello fue el acabose. ¿Qué más podía esperar Galileo de su estancia en Roma? Nada. Y el mes de agosto podía ser terrible en la ciudad de ciudades, así que se marchó a Florencia.

Lo que no podía sospechar Galileo en su alborozo era que un oscuro fraile que se pasaba la vida entre legajos había decidido investigarle. ¿Aquel famoso Galileo no le sonaba a él de algo? Su nombre había salido a relucir de refilón en el proceso que se seguía contra el filósofo aristotélico Cesare Cremonini, un colega suyo de Padua que siempre, aunque amistosamente, se había opuesto al tal Galileo. Los archivos de la Inquisición son la leña que alimenta el fuego que da brillo a la fe.

La noticia del éxito de Galileo en Roma llegó a Florencia antes que él. Casi todo gran hombre genera envidiosos, detractores e imitadores. En cuanto Galileo descansó del viaje de regreso, le dieron la noticia de que un tal Ludovico delle Colombe iba por ahí criticándole ante todo el que lo quisiera escuchar, y el caso es que su audiencia era cada vez más numerosa.

Galileo menospreció a aquel individuo y a sus seguidores, a los que llamaba la «liga del pichón» (*colombe* significa «palomas»), por lo que no se dignó ni siquiera a interesarse por qué aspectos de su ya magna obra le criticaban. Pero el pichón fue astuto y planteó un duelo: con argumentos aristotélicos, demostraría que Arquímedes y Galileo estaban equivocados en cuanto a las razones por las que algunos cuerpos flotan

y otros se hundían. Cuando Galileo se enteró, le entró una risa incontrollable. Colombe consiguió que, si Galileo aceptaba, el jurado lo compusieran nada menos que dos cardenales, el gran duque Cosimo y su madre la gran duquesa Cristina. *Mamma mia!* Eso eran palabras mayores. Naturalmente, Galileo no iba a desaprovechar la ocasión de lucirse ante semejante audiencia. En cuanto quisiera el tal Colombe se presentaría en el palacio Pitti.

¿Qué podía hacer una pobre paloma ante un halcón como Galileo? Perecer ignominiosamente. La teoría del aristotélico era que los cuerpos flotaban a causa de su forma, no del peso del líquido que desalojaban. Galileo, con unos trozos de hielo (en aquella época no eran fáciles de conseguir) y otros de madera de distintas clases (algunas, como el ébano, hasta se hundían) y formas, humilló al clérigo.

Esta anécdota no hubiera sido relevante en estos rasgos biográficos si no fuese por un detalle fundamental: uno de aquellos dos cardenales que presenciaron el desafío era Maffeo Barberini, quien, naturalmente, quedó encandilado y entusiasmado por Galileo. Pronto se convertiría en el papa Urbano VIII y desempeñaría un papel esencial en el resto de la vida de Galileo Galilei.

Otros ataques y plagios que sufrió Galileo fueron de mucha mayor entidad. Por ejemplo, en Ausburgo se había publicado un tratado llamado *Tres cartas sobre las manchas solares*, firmado por alguien que usaba el extravagante pseudónimo de «Apeles escondido tras el cuadro». En él se decían dos cosas increíbles: las primeras observaciones de las manchas las había hecho el tal Apeles, y clamaba que no eran otra cosa que sombras de estrellas que pasaban por delante del Sol. Galileo quedó estupefacto, porque, además, pronto averiguó que aquel bávaro que usaba el nombre del gran pintor griego de la Antigüedad era nada menos que el padre jesuita Christoph Scheiner, al que él tanto había elogiado en Roma. Galileo decidió escribir tres cartas defendiendo sus tesis.

Los nuevos escritos de Galileo sobre las manchas solares eran tan buenos que le dio pena dirigírselos sólo al tal Apeles, así que tuvo la ocurrencia de enviárselos también a su amigo el príncipe Cesi, el lince de Roma. La Accademia dei Lincei los publicó inmediatamente bajo el

título *Historia y demostraciones de las manchas solares y sus propiedades*. Todo lo que se decía en este tratado lo había explicado Galileo otras veces, salvo en un aspecto: hasta entonces nunca había dejado constancia escrita de su adhesión al copernicanismo, y en estas cartas lo hacía profusamente.

Puede que el lector se esté haciendo una idea negativa del gran Galileo. Está en su derecho, pero hay que advertir lo siguiente: a pesar de su apego al dinero y a la vida aristocrática, su ambición sin límites, su arrogancia y su soberbia, Galileo era una buena persona y siempre fue amigo de sus amigos. El siguiente hecho es una muestra de ello, y Galileo era consciente de lo que se jugaba al llevarlo a cabo.

Cuando Galileo dejó Pisa, su plaza fue ocupada por el estudiante más brillante que tuvo allí: Benedetto Castelli. Éste le escribió una carta en la que manifestaba su inquietud y le pedía consejo. Le contaba a su maestro que la gran duquesa Cristina de Lorena lo había llamado para exponerle una duda que la había asaltado. Estamos ya en diciembre de 1613. La piadosa Cristina le preguntó al joven matemático si no había contradicción entre el sistema copernicano que Castelli defendía y la Biblia, en concreto con el pasaje del Libro de Josué que dice que Dios mandó detenerse al Sol para que al gran conquistador de la tierra de Canaán, jefe máximo de los hebreos después de Moisés, no se le escapara ni un enemigo en retirada amparándose en la noche. Un pasaje muy piadoso y edificante. Si Dios mandó detenerse al Sol, ¿cómo osa ningún mortal decir que el Sol está quieto y es la Tierra la que se mueve?

Galileo presintió no sólo lo delicado que era el asunto, sino el peligro que conllevaba. Pero no dejó abandonado a su discípulo. Le escribió una larga carta en la que divagaba sobre la relación entre lo que dicen de forma literal las Sagradas Escrituras y lo que se puede observar directamente. A veces, algunos pasajes contradicen los hechos observados, pero lo que interesa es el fondo: Dios habría ayudado a Josué en su carnicería tanto en el sistema ptolemaico como en el copernicano.

Castelli, muy contento y agradecido a su maestro, empezó a mostrarle la carta a todo el mundo. Nada malo ocurrió. Al cabo de algún tiempo, Galileo se enteró de que su carta era tan del dominio público

que incluso se había publicado. A Galileo le pareció que si la gran duquesa se enteraba se lo podía tomar como una descortesía, y nada estaba más lejos de los deseos de su humilde servidor. Así que escribió otra carta dirigida personalmente a ella en la que ampliaba y detallaba su parecer en cuanto a la supremacía de la observación y la comprobación experimental respecto a la literalidad de las Sagradas Escrituras. Terminaba citando al gran cardenal Cesare Baronius, que dejó dicho: «La Biblia nos dice cómo se va al cielo, no cómo va el cielo». Pero en diciembre de 1614, justo un año después de la charla de Castelli con la duquesa, a Galileo le llegó la noticia de que un joven dominico llamado Tommaso Caccini había lanzado desde el púlpito una tremenda diatriba contra los copernicanos y, por primera vez, al más famoso científico, matemático y filósofo de Europa, Galileo Galilei, lo habían acusado de herejía. Aquello le pareció tan injusto a Galileo que estuvo a punto de darle una apoplejía, pero, para gran alivio suyo, recibió enseñada una carta del superior de los dominicos pidiéndole excusas por los excesos del joven fraile.

Convertirse en guardián celoso de la fe ha debido de ser una tentación muy grande para infinidad de religiosos. ¿Qué manera hay de demostrar más fehacientemente ese celo (y que dé más fama) que atacando al más grande hombre de aquellos tiempos? Otro dominico, el padre Niccolò Lorini, fue mucho más allá que su colega Caccini: simplemente denunció a Galileo por herejía ante la Inquisición enviando a Roma, junto al pliego de denuncia, la copia de la carta a Castelli y varios escritos más.

Galileo, sabedor de esta denuncia, se sentía mal, tan mal que enfermaba con frecuencia. Unos meses más tarde, en marzo de 1615, recibió una alegría por entonces harto infrecuente: un fraile carmelita llamado Paolo Antonio Foscarini había publicado en Nápoles un librito titulado nada menos que *Opinión copernicana y pitagórica del movimiento de la Tierra y el reposo del Sol y sobre el nuevo sistema pitagórico del mundo en el que se armonizan y reconcilian aquellos pasajes de las Sagradas Escrituras con las proposiciones teológicas que se podrían aducir en contra de esta opinión*. La ventaja de semejante título es que no hay necesidad de leer el libro. Así

pues, un miembro de la Iglesia declaraba que la teoría copernicana era compatible con la Biblia.

Galileo concluyó que tenía que viajar a Roma, que no podía permanecer tranquilo con una denuncia en la Inquisición. Lo mejor sería ir allí y hablar con el Papa y con el cardenal Bellarmino, el jesuita que había certificado sus descubrimientos, para que detuviesen el proceso que sin duda se había iniciado. Lo que no sabía era que el insigne jesuita, coherente con la frase con que remataba su certificado, le había escrito una carta al carmelita Foscarini advirtiéndole de que tratara la teoría de Copérnico como una simple hipótesis. En sus comentarios aludía a Galileo.

A causa de sus problemas de salud, que ya se estaban haciendo habituales, Galileo no inició el viaje a Roma hasta diciembre de aquel infausto 1615, con los cincuenta y un años ya cumplidos.

El Vaticano, siempre previsor y sobre todo porque la Inquisición así lo aconsejó, había organizado un comité para estudiar a fondo el asunto de Copérnico y no dejarse enredar con facilidad por un científico tan astuto como Galileo. La conclusión fue clara y simple (y famosa): «[...] siendo por tanto totalmente erróneo que la Tierra tenga ningún tipo de movimiento anual [...] por lo que resulta que la doctrina copernicana en cuanto que sitúa al Sol en el centro del universo es loca, absurda y formalmente herética».

Cuando Galileo tuvo noticia de semejantes conclusiones (se las dieron a leer nada más llegar a Roma), quedó sorprendido, pero tuvo el ánimo de escribirle una carta al ilustrado cardenal Orsini, que en su visita anterior le había mostrado un cálido afecto, diciéndole con todo respeto que las mareas demostraban que la Tierra se movía. No hubo respuesta, y los días pasaban en Roma pesadamente.

El 26 de febrero, Galileo recibió un billete en el que el cardenal Bellarmino lo invitaba a visitarlo aquella misma mañana en su residencia para hablar con él. Galileo se apresuró y el jesuita lo recibió con amabilidad, pero acompañado por un inquisidor. La razón de la entrevista era advertirle de que no debía enseñar, defender o discutir la doctrina copernicana. Cuando Galileo iba a empezar a hacer justamente eso, dis-

cutirla, el inquisidor le enseñó un papel en el que no había ni encabezamiento ni firma. Era, obviamente, una copia de algunas frases de un documento completo. Galileo leyó justo lo que acababa de escuchar, pero con el escueto añadido: «desobediencia conllevaría prisión». Galileo miró a Bellarmino y no le hizo falta preguntar para saber que el remitente era el propio Paulo V y el destinatario la Inquisición. Galileo aceptó con mansedumbre y fue despedido con cariño por el cardenal, el cual le dijo que todo aquello se haría público en un edicto.

Al principio, Galileo pensó en regresar a Florencia, pero en realidad lo apropiado hubiese sido esperar el decreto vaticano y no estar en un sinvivir en la Toscana hasta que apareciera, sujeto además a todo tipo de interpretaciones y rumores que llegaran desde Roma. El edicto se publicó a finales de marzo, y Galileo de nuevo se sintió optimista y lleno de vida: la Congregación del Índice suspendía el libro de Copérnico hasta su corrección y prohibía el del carmelita Foscarini. De Galileo no decía ni una palabra.

La alegría del habitualmente optimista y disipado Galileo no tenía fin, pero el susto había sido tan grande que pensó que había que asegurarla. Solicitó audiencia al Papa y éste se la concedió de inmediato. Paulo V le dijo que no se preocupara, porque él lo avalaría siempre que cumpliera... ya sabía él con qué. Sólo faltaba algún papel de Bellarmino, quien, al fin y al cabo, nunca había dejado de ser amable con él. El cardenal jesuita no se hizo rogar: certificó por escrito que Galileo Galilei no estaba sometido a juicio alguno ni pesaba sobre él condena de ninguna clase.

Libre de toda pesadumbre, Galileo volvió a ser el de siempre: dicharachero y polemista en todos los salones nobles de Roma, donde se quedó tres meses más. De Copérnico y de los movimientos de la Tierra ni una palabra, vale, pero de lo demás, lo cual era muchísimo, se puede hablar, ¿no? Pues a discutir y brillar, y con quiénes más, con los linceos. Su osadía llegó a tal extremo que el cónsul de la Toscana lo llamó y le recomendó que «no molestara más al perro dormido», añadiendo que «había oído rumores que no le gustaban». «No se hable más del asunto, amigo mío: mañana mismo parto para Florencia.»

Nada más llegar a su ciudad natal, Galileo se lleva otra alegría: gracias a la intercesión de su admirador y amigo el cardenal Maffeo Barberini, sus adoradas hijas Virginia y Livia tomarán los hábitos pronto, la primera y niña de sus ojos (ya se verá cómo de literal fue esto) se llamará sor María Celeste; la segunda, sor Arcángela.

El cielo nocturno se animó mucho durante los últimos meses de 1618 porque aparecieron tres cometas, uno de ellos muy brillante. Galileo continuaba enfermado por rachas. Estando en una de ellas, allá por enero, recibió un fajo de pliegos muy bien impreso cuyo remitente era Bellarmino desde Roma. Era la transcripción de una conferencia: «Sobre los tres cometas del año MDCXVIII. Una disputa presentada en público en el Colegio Romano de la Compañía de Jesús por uno de los padres de la Compañía». El autor era Orazio Grassi. Galileo lo leyó con gran interés hasta que, al concluir, movió la cabeza desaprobadoramente. Según el jesuita, aquellos tres cometas demostraban la falsedad de las ideas copernicanas.

El lector irá sacando sus conclusiones sobre las posturas científicas y políticas de unos y otros, pero no dejará de reconocer que el ardor con que se defendían la ciencia y la cultura entre las clases altas de la sociedad europea en aquella época era fascinante. Así, ante la publicación de Grassi, mucha gente inquirió la opinión del maestro Galileo. Quizá una de las más notables súplicas le vino del archiduque Leopoldo de Austria. Galileo, a pesar de estar bastante postrado, le expuso a quien se lo pidió sus críticas al jesuita.

En junio de aquel año, un discípulo de Galileo llamado Mario Giuducci dio una conferencia sobre los cometas en la que mostraba su desacuerdo con la interpretación de Grassi del fenómeno. Fue a la imprenta con el título: *Discurso sobre los cometas impartido por Mario Giuducci en la Accademia Fiorentina durante su periodo como cónsul*. El manuscrito, obviamente, era en buena parte debido a Galileo. ¿Por qué no lo firmó? No fue por esconderse, eso no lo había hecho Galileo jamás, sino, quizá, por culpa de la enfermedad, porque el título de la respuesta de Grassi, éste sí usando un pseudónimo (Lotario Farsi), no podía ser más elocuente: *El balance astronómico, en el cual las opiniones de Galileo Galilei*

sobre los cometas se sopesan, así como las presentadas por Mario Giuducci en la Accademia Fiorentina.

Por primera vez en su vida Galileo no estaba para disputas, ya fuese porque su salud no se lo permitía, bien porque necesitaba sosiego en su trabajo. Además, los cuatro años transcurridos entre que aparecieron las insensateces de Grassi y que la respuesta de Galileo fue autorizada por la Iglesia, es decir, entre 1619 y 1623, pasaron cosas muy interesantes. Por ejemplo, Galileo fue elegido cónsul de la Accademia Fiorentina, el papa Paulo V murió, el gran duque Cosimo II de Medici también, y el cardenal Maffeo Barberini le escribió un poema a Galileo titulado «Adulatio Perniciosa», en el que lo ponía por las nubes.

La importancia de estos acontecimientos radica, por orden, en que el respeto y la admiración hacia Galileo se extendía a todas las esferas de poder; Paulo V era muy severo pero siempre había favorecido a Galileo, y de su sucesor, Gregorio XV, no se sabía qué actitud tendría respecto a la ciencia; al gran duque, siempre protector de Galileo, le sucedió Fernando II, o más bien, su madre y su abuela, porque el joven tenía once años, y precisamente su abuela, la gran duquesa Cristina de Lorena, ya sabemos cómo pensaba en cuanto a la Biblia, por un lado, y de todo lo demás, por otro. Todos los nubarrones que suponían estas circunstancias se disiparon como por ensalmo al morir prematuramente el nuevo Papa (duró dos años y medio) y sucederle nada menos que Maffeo Barberini. ¡El nuevo Papa, Urbano VIII, era un gran amigo y admirador de Galileo Galilei! (véase la figura 3.3).

La esperada respuesta de Galileo a Grassi llegó en la forma de un folleto titulado «Il Saggiatore» que podríamos traducir como «El experimentador». Naturalmente, iba dedicado al nuevo Papa y se publicó en Roma bajo los auspicios de la Accademia dei Lincei, cómo no, y con todos los permisos eclesiásticos. En este opúsculo brilla como el diamante la siguiente frase que el lector sin duda conocerá: «La filosofía está escrita en el libro del universo, el cual está continuamente abierto a nuestra mirada. Pero el libro no puede entenderse a menos que uno aprenda primero a comprender el lenguaje y a leer el alfabeto en que está escrito. Este lenguaje es el de las matemáticas, y sus caracteres son



Figura 3.3. El papa Urbano VIII, Maffeo Barberini.

triángulos, círculos y otras figuras geométricas. De otra manera es humanamente imposible comprender una simple palabra de él; sin esto uno vagaría por un laberinto oscuro». Esta frase junto con los innumerables frutos que a lo largo de su vida le habían proporcionado la medición y la experimentación de los fenómenos crearon nada menos que la física moderna y, por añadidura, el método científico.

En la primavera de 1624, después de pasar un invierno horrible en cuanto a salud, Galileo partió otra vez para Roma. En esta ocasión, para encandilar a la curia y en particular a su amigo el Papa, fue con el microscopio. Este invento, como el telescopio, era flamenco, pero Galileo construyó unos artilugios que ampliaban la visión de manera que, por ejemplo, mostraban detalles fascinantes de los insectos.

Urbano VIII lo recibió nada menos que seis veces, y no sólo lo trató con deferencia, sino que además le prometió que lo apoyaría siempre y que podía escribir lo que quisiera. «¿Sobre Copérnico también, Santidad?» «Claro, hombre de Dios, ¿cómo vamos a condenar por hereéticas vuestras teorías si no están demostradas? ¿Acaso no se ha autorizado el libro de Copérnico con cambios menores?» «Es cierto, Santidad.» «Puedes escribir lo que se te ocurra, no temas.» Tome nota el lector, porque el matiz forma parte de la historia: si un aserto científico no se demuestra no hay nada que temer; los problemas, y muy serios, surgirían si se demostrase.

Aparte de esto, Galileo recibió muchas más muestras de afecto del Papa, y no sólo durante aquella visita, sino también años después. Por ejemplo, concedió una pensión de 60 escudos a Vincenzo, el hijo de Galileo, con el que, por cierto, no se llevaba nada bien, y a él mismo un sobresueldo vaticano de 40 escudos. Sin embargo, Galileo había encontrado muy cambiado a su respetado amigo Maffeo. No había prestado la más mínima atención al microscopio y sólo hablaba de campañas militares y dinero. Además, Galileo observaba con disgusto que en su trato con los cardenales y sirvientes su amigo se mostraba indefectiblemente airado o despectivo. En toda Roma se hablaba del carácter despota y autocrático del nuevo Papa, y el tradicional nepotismo de la Iglesia estaba llegando a unos extremos alarmantes.

Galileo no encontró en Roma las distracciones de antaño, entre otras cosas porque su inquietante, aunque fidelísimo amigo, el príncipe lince Federico Cesi estaba muy enfermo, tanto que no tardó mucho en morir. Galileo regresó a Florencia, volvió a su investigación sobre las mareas y comenzó a escribir sus deliciosos *Diálogos*, pero esto merecía tratarse aparte.

Llegaron unos años plácidos para Galileo, quizá porque su ímpetu polemista se había apaciguado mucho. Posiblemente influyó en ello que Vincenzo le hubiera dado un nieto y que sus relaciones se fueran normalizando, tanto que al bebé le pusieron Galileo. Además, nuestro insigne hombre se estaba cansando de ciertas polémicas con jóvenes eclesiásticos que lo único que buscaban al provocarlo era medrar. Por ejemplo, hubo un fraile al que le dio por atacar el atomismo que defendía en «El experimentador» diciendo que era incompatible con la Eucaristía, porque si no a ver cómo se explicaba a base de átomos el hecho inconvencible de la transustanciación del pan y el vino en la carne y la sangre de Cristo. Galileo, por primera vez, hizo lo que debía: ni caso.

En este tipo de anotaciones biográficas no se pueden pasar por alto los errores o sinsentidos que los grandes hombres cometen, y el caso de Galileo no es una excepción. Valgan dos ejemplos aunque se podrían poner más. En 1630 murió Johannes Kepler, sin duda el más eminente astrónomo de aquella época. Este alemán hizo cosas grandiosas, pero resaltaremos dos: siempre admiró a Galileo y descubrió que las órbitas de los planetas al girar en torno al Sol no eran circulares, sino ligeramente elípticas. El Sol estaba en uno de los focos de la elipse. Lo primero, es decir, su admiración por Galileo, llevó a Kepler a trasladar sus observaciones al lenguaje matemático. Así, enunció leyes universales con fórmulas y figuras geométricas. Eso es ser consecuente con una convicción. Pues Galileo hizo con Kepler justo lo contrario, es decir, se puso en plan aristotélico. ¿Cómo iban a ser elípticas, o sea, imperfectas, las órbitas de los planetas? ¿Adónde iría a parar la armonía del mundo si eso fuese cierto? ¿Cómo iba a permitir Dios semejante grosería? Decir cosas de este jaez, como dijo Galileo de las leyes de Kepler, demostraba que de tanto atacar a Aristóteles Galileo no había podido evitar contagiarse del vicio aristotélico de lanzar afirmaciones sin buscar el más mínimo contraste con la experiencia y la observación.

La segunda crítica que se le puede hacer a Galileo es mucho menos grave, entre otras cosas porque no fue un fallo sino un sinsentido. Desde Eratóstenes, y sobre todo desde que los portugueses y los españoles se pusieron a navegar por todo el ancho mundo, se sabía situar perfec-

tamente un barco en cuanto a su latitud, pero su longitud era harina de otro costal. La primera se determina con la ayuda del Sol e instrumentos sencillos, porque lo único que hay que medir es un ángulo. Pero para calcular la longitud hay que tener en cuenta que la Tierra da una vuelta en torno a sí misma cada veinticuatro horas. O sea, que hay que medir el tiempo.

Imagine el lector que lo secuestran anestesiándolo. Despierta en una habitación cerrada y sin ventanas donde lo único que hay es un reloj de pared. Los secuestradores le han dejado el suyo de pulsera. Mira la hora y ve que hay tres de diferencia entre ambos relojes. Concluye que está en un país de ese huso horario: allá por Rusia, Irán, Afganistán, etc. Así pues, para situarse hay que tener un buen compás que nos dé la latitud y un reloj que funcione con exactitud a pesar del vaivén del barco.

Pues Galileo, en vez de estrujarse el magín para construir un reloj que funcionase con exactitud y fuese estable en un barco, o sea, sin péndulo alguno, como los que a él le gustaban, se empeñó en que no hacía falta porque ¿qué mejor reloj que Júpiter y sus cuatro lunas? No había más que medir exactamente las posiciones relativas de los cinco objetos y con unas tablas detalladas averiguar el tiempo transcurrido desde que el barco abandona el muelle. Esto es del todo correcto, pero ¿qué piloto se iba a entretener en observar atentísimamente con un magnífico telescopio las lunas de Júpiter en noches claras y con el barco moviéndose continuamente? Ninguno. Por más que los marinos le decían a Galileo que aquello no era práctico, él se empecinaba cada vez más. No cejó hasta que a finales de 1629 quiso venderle el invento a los españoles. ¿Quién iba a estar más interesado en el invento que la Corona española, puesto que la longitud para ellos era incluso más importante que para los portugueses? Los marinos y cartógrafos españoles le metieron tal rapapolvo que Galileo desechó definitivamente la idea. ¿Se habría subido Galileo alguna vez en su vida a un barco?

Galileo tenía ya sesenta y seis años y estaba terminando los *Diálogos*. Esta obra la escribió utilizando un artificio inédito en él y muy ingenioso. Como no deseaba molestar más a la Santa Madre, siguió su reco-

mendación de escribir y hablar siempre en hipótesis. Se le ocurrió crear tres personajes que debaten sobre los sistemas solares concebidos por Copérnico y Aristóteles. El título completo de la obra es *Diálogos sobre los dos grandes sistemas del mundo*. Los dos primeros personajes eran caracterizaciones de amigos suyos que ya habían muerto: Francesco Sagredo, el del grandioso imán, y Filippo Salviati. Éste hablaba por el propio Galileo y Sagredo hacía de embustero inteligente. El tercero era un aristotélico al que llamó Simplicio.

En cuanto tuvo listo el libro, Galileo se fue a Roma para conseguir el permiso de la Iglesia para su publicación. Urbano lo recibió y, aunque apenas hojeó el manuscrito, le dijo que no creía que hubiera problemas. Los lince, cuya academia siempre había publicado lo que Galileo les enviaba, no eran los mismos que en vida del príncipe fundador. Galileo decidió marcharse cuanto antes a Florencia porque en Roma se había declarado un brote de peste bubónica y podía quedar retenido en la ciudad a causa de la cuarentena. Pero, muy prudentemente, antes de marcharse solicitó, y le fue concedido, el permiso condicional de la Iglesia para publicar los *Diálogos*.

En la primavera del año siguiente, 1631, ayudado por el embajador en Roma del gran duque Fernando II, ya mayor de edad, Galileo consiguió el siguiente acuerdo: el prefacio y el epílogo (en el lenguaje científico de hoy día se diría la introducción y las conclusiones) tendrían que ser aprobados por la Secretaría del Estado Vaticano, y el resto lo tendría que aprobar la Inquisición de Florencia. Era un buen acuerdo para Galileo, porque aceleraba mucho el proceso y ya tenía impresor en Florencia. Así, menos de un año después, en febrero de 1632, se publicaron los *Diálogos*.

El éxito del libro fue clamoroso, seguramente porque estaba escrito en un lenguaje divulgativo. La gente agradece que los científicos hagan esfuerzos para ser entendidos. Además, el diálogo entre personajes hacía muy ameno aquello de los grandes sistemas del mundo. La diversión no pasó del verano: el impresor recibió una orden taxativa de la Inquisición prohibiéndole imprimir y vender ni un ejemplar más de los *Diálogos*. Galileo recurrió a la autoridad del mismísimo Papa. Pobre Galileo:



Figura 3.4. Anteportada del *Diálogo de Galileo*.

había sido Urbano VIII el que había instado a la Inquisición a que prohibiera el libro. De inmediato se corrió la voz de que Su Santidad se había identificado con Simplicio. Además, el Papa, fuera de lo acostumbrado, presidió una reunión de los más altos dignatarios de la Inquisición y les urgíó a que le hicieran un requerimiento a Galileo.

Galileo, más asombrado que temeroso, respondió que obedecería sumisamente, pero solicitó que el juicio al que se le requería se celebrara en Florencia y no en Roma, porque su estado de salud le impedía viajar. La respuesta de Urbano VIII, recibida un mes después, en noviembre, fue fulminante: debía ir a Roma de buen grado o a la fuerza.

El inquisidor florentino le escribió al Papa diciéndole que había visitado a Galileo y que estaba realmente enfermo, tanto que tres médicos habían certificado que no podía emprender un viaje a Roma. La contestación del Papa tampoco se hizo esperar: iría a Roma de buen grado o encadenado. Para colmo, la peste bubónica, que había remitido hacía muchos meses, volvió a aparecer.

Tras pasar dos horribles semanas de cuarentena en los alrededores de la ciudad, Galileo llegó a Roma el 13 de febrero de 1633. Como favor especial al gran duque de la Toscana, Fernando II de Medici, el Papa permitió que Galileo se alojara en la residencia del embajador toscano. Pero le quedaba prohibido establecer contacto con nadie, de tal modo que se podía considerar bajo arresto domiciliario.

La Inquisición no inició el juicio hasta abril. El interrogatorio y la vista no fueron demasiado duros, pues duraron apenas tres semanas, y el calabozo de Galileo era una habitación bastante confortable. Los inquisidores, nada menos que diez cardenales, pusieron especial énfasis en el mandato que diecisiete años antes le había impuesto a Galileo el ya difunto Bellarmino: aquello de que no debía considerar el sistema copernicano más que como una hipótesis. En realidad, no le dieron muchas vueltas al hecho de si la Tierra se movía o dejaba de moverse, porque al fin y al cabo allí se estaba tratando de poder, no de ciencia y religión.

Pero, en fin, todos estuvieron de acuerdo en que el asunto no tenía tanta importancia y que Galileo era un buen ciudadano, temeroso de Dios y amante padre de dos monjas. Así que los santos padres del tribunal le prometieron que si reconocía que había obrado mal (ni siquiera tendría que declararse culpable de cargo alguno) la sentencia sería tan suave que iría poco más allá que una penitencia con ánimo de enmienda, lo cual incluía rezos, misas y cosas por el estilo.

Galileo, por supuesto, aceptó prometiendo incluso que en las siguientes ediciones de los *Diálogos* suavizaría las opiniones de los personajes sobre el sistema copernicano.

A los pocos meses, en concreto el 21 de junio, Galileo recibió una carta estremecedora: al día siguiente tenía que presentarse en la Inquisición para oír la sentencia. Lo estremecedor era que el requerimiento estaba hecho con amenaza explícita de tortura y que estaba firmado por el propio Urbano VIII.

La sentencia se dictó el 22 de junio: los *Diálogos* entran en el Índice de Libros Prohibidos y a su autor, Galileo Galilei, se le condena a cadena perpetua. Estaba firmada por sólo siete de los diez cardenales. A causa del desasosiego, por no decir terror, de Galileo, abjuró de sus errores en una ceremonia organizada *ex profeso* en la iglesia de Santa María de Minerva. Cuenta la leyenda que al final de este cónclave Galileo susurró «Eppur si muove», o sea, que la Tierra se mueve, se pongan como se pongan y se diga lo que se diga.

De nuevo he de llamar la atención del lector sobre la conveniencia de no poner especial énfasis en el carácter arrogante e interesado de Galileo. Era así, sin duda, pero ya he dicho que también era una buena persona y firme en sus ideas. De hecho, Galileo siempre tuvo muchos más amigos que enemigos, de manera que un buen número de prohombres se movilizó para apoyarlo en su caída en desgracia. Éstos no eran tan poderosos como Urbano VIII, pero tampoco eran cuatro pelagatos. Por lo pronto, Niccolini, el embajador toscano en Roma, consiguió que el lugar de internamiento de Galileo fuera la propia embajada y más tarde la residencia del arzobispo de Siena. Seguramente a Urbano VIII dicha petición le pareció extraña, pero debió de considerar que era mejor no echar más leña al fuego.

Galileo llegó en pleno verano a la casa del arzobispo de Siena y se quedó impresionado. Aquello era un palacio lleno siempre de poetas, científicos, escritores, pintores y gente que desarrollaba actividades aún más lúdicas y creativas que aquéllas. El caso es que Galileo se sintió de nuevo dichoso y volvió a escribir. Comenzó, a los setenta y tantos años, *Discurso de dos ciencias nuevas*. Trataba de las leyes del movimiento y las

propiedades de los materiales, en particular su resistencia. En lenguaje moderno diríamos la cinemática clásica y la ciencia de materiales.

Pero aquella placidez se esfumó pronto: María Celeste, su amada hija Virginia, estaba muy enferma. Galileo solicitó al Papa permiso para ir a una villa que tenía en Arcetri, en las afueras de Florencia, para estar cerca del convento de sus hijas. El Papa se lo concedió porque sus espías ya le habían informado de que la vida de Galileo en Siena, en el palacio del arzobispo, no era muy acorde con lo que se merecía un hereje. Por supuesto, en Arcetri estaría en el mismo régimen: arresto domiciliario perpetuo.

¿Qué actitud adoptaría Urbano VIII, su entrañable amigo Maffeo, hacia él? Que se hubiera sentido ofendido por la alusión a Simplicio no se puede descartar en absoluto, pero ¿era ésta una razón suficiente para despertar hasta tal punto la crueldad de una persona, aunque fuera tan extraordinariamente soberbia como el Papa? El caso es que aquel invierno Galileo padeció una dolorosa hernia y el Papa no sólo le negó permiso para ir a Florencia a que le vieran los médicos, sino que le advirtió que si recibía una sola solicitud más de aquel estilo, pasaría el resto de sus días en una prisión de verdad. Nada más llegar la primavera, María Celeste murió y con ella se fue el escaso resto de alegría que le quedaba a Galileo. Las ciento veinte cartas que se conservan de María Celeste a su padre son una bella exaltación del amor filial.

Dos años más tarde, un impresor holandés, Louis Elsevier, visitó a Galileo en Arcetri y le ofreció publicar el *Discurso*. La editorial del mismo nombre es hoy día una de las más prestigiosas del mundo de la física y de otras ciencias.

El *Discurso* fue otro éxito en cuanto salió a la luz. Su fama conllevó un honor al que antiguamente tenía Galileo tanto apego: los Estados Generales de los Países Bajos le ofrecieron una cadena de oro de 500 florines, pero no por el *Discurso* sino... por sus esfuerzos en determinar la longitud con los satélites de Júpiter. Paradójico, ¿no? Pero la verdad es que lo merecía. El caso es que Galileo, cosa inverosímil, rechazó la cadena para ver si así se reconciliaba con el Papa. Acertó: Urbano VIII elogió el gesto, pero se negó a levantar el arresto domiciliario. Galileo

ya estaba ciego de los dos ojos. Poco después, el 8 de enero de 1642 a los setenta y ocho años de edad, Galileo Galilei murió en Arcetri.

El lector quizá esté sorprendido porque le hayamos dedicado tantas páginas a la biografía de Galileo, cuando de lo que se trata en este libro es de explicar los más bellos experimentos de la historia de la física. Espero que se las haya saltado si no le han interesado, pero lo he hecho porque estamos hablando de algo que va más allá de la biografía de un gran hombre, ya que el debate que generó Galileo aún está vivo y ejerce una influencia mayor de lo que imaginamos. Por ejemplo, el papa Juan Pablo II organizó una comisión de físicos católicos para que estudiaran el caso de Galileo. Dicha comisión trabajó durante catorce años. Al final, en 1992, el Papa pidió perdón por la condena a Galileo, pero lo hizo con la boca pequeña, puesto que aquellos físicos concluyeron que el juicio fue justo y que, en realidad, la Iglesia se había equivocado pero Galileo también, porque no había demostrado nada. Aún más recientemente, a mediados de septiembre de 2003, el arzobispo Angelo Amato, inquisidor jefe, es decir, secretario de la Congregación para la Doctrina de la Fe, que así se llama hoy día el Santo Oficio (¿el lector creía que esta aberración había desaparecido?), dijo que todo lo que se ha escrito sobre el proceso contra Galileo ha sido una mentirosa imaginación (*menzognera iconografia*) dirigida a arrinconar al Vaticano en el desván del oscurantismo y la crueldad, añadiendo que el juicio a Galileo se produjo más bien por culpa de los aristotélicos de Pisa que de la Iglesia y que, en cualquier caso, si Galileo renegó de sus descubrimientos fue por miedo a ir al infierno y no a causa de la crueldad de la Iglesia. Sin duda, lo que le habían hecho a Giordano Bruno treinta años antes fue tan fútil que a Galileo se le había olvidado.

De la grandiosa obra de Galileo, los colegas que han elegido los experimentos de la historia que dan base a este libro escogieron el que estudia la caída libre de los cuerpos. Creo que lo han hecho con todo fundamento, y sería torpe por mi parte no lograr transmitir al lector la importancia del mismo. Se trata del experimento de las bolas dejadas caer desde la torre de Pisa. Se dice que Galileo llevó a cabo esta prueba a los veintiséis años. En realidad, Galileo no se dedicó a poner a prue-

ba su intuición en cuanto al tremendo error de Aristóteles tirando bolas desde ninguna torre, sino utilizando un plano inclinado. La inmensa ventaja de Galileo respecto a Aristóteles fue que el toscano midió, mientras que el estagirita se limitó a aceptar su intuición y, sobre todo, el principio de autoridad de sus antecesores, cosa que sus sucesores siguieron haciendo durante veinte siglos. Aristóteles dijo que los cuerpos caían más o menos rápidamente en virtud de su peso, es decir: existía una relación entre el peso y la velocidad. Por supuesto, también era obvio que la distancia recorrida por un cuerpo en movimiento era siempre proporcional al tiempo que llevaba moviéndose. Galileo lo midió y vio que todo era rotundamente falso. Como dijo el propio Galileo en su época más prudente: «Hay dos clases de imaginación poética, la que inventa fábulas y la que está dispuesta a creérselas».

¿Qué midió Galileo? Aquí viene el primer signo de grandeza: el espacio y el tiempo. Al otorgarles la categoría de sede de los fenómenos físicos del universo, por primera vez se les da a ambas magnitudes la importancia que merecen. ¿Por qué las midió? Porque a partir de ellas se podían definir las magnitudes que describen esos fenómenos físicos, por ejemplo, la velocidad y, sobre todo, la aceleración. ¿Para qué? Para establecer leyes universales, es decir, fórmulas matemáticas que describan y predigan el movimiento en la Toscana, en Roma o en Júpiter.

Vayamos por partes. Empecemos por medir el espacio y el tiempo. Para medir una distancia entre dos puntos utilizamos reglas, es decir, un listón marcado con rayas separadas por longitudes idénticas. Esto no parece difícil. Galileo usaba reglas de latón con marcas separadas entre sí algo menos de un milímetro, en concreto, 0,094 cm. Naturalmente, él no conocía el sistema métrico decimal, por lo que a esa distancia le llamaba, porque sí, «punto». Pasemos al tiempo. Esto sí que es difícil. Galileo medía el tiempo de tres formas. La primera, la menos práctica, aunque parezca mentira, era con el péndulo. No es necesario explicar al lector cómo lo hacía porque lo puede imaginar fácilmente, y además, Galileo apenas utilizó este método, aunque a lo largo de toda su vida hubiese pensado en diferentes ocasiones en cómo construir un reloj basado en el péndulo. Galileo solía medir intervalos de tiempo con un

reloj de agua. De un recipiente grande pasaba agua a otro, éste graduado, a un ritmo uniforme a través de un tubo que tenía un grifo. Éste permitía abrir o cortar el flujo de agua. Midiendo y midiendo, graduó sus tubitos y llegó a la conclusión de que el flujo de su «reloj» era de (lo que hoy llamaríamos) 1.440 centímetros cúbicos por segundo: casi litro y medio; tanto volumen por segundo era conveniente porque cuanto más agua pasara de un recipiente a otro más precisa era la medida. El caso real es que Galileo llamaba «grano» a la unidad de cantidad de agua y que la precisión que podía medir era de 16 granos de agua. Al intervalo de tiempo que se necesitaba para pasar esa cantidad de agua de un recipiente a otro lo llamó «tempo». Equivalía a $1/92$ segundos: ¡Galileo era capaz de medir el tiempo con una precisión de casi una centésima de segundo!

La tercera forma de medir el tiempo que tenía Galileo era la más divertida: tocando el laúd. Recuerde el lector que don Vincenzo Galilei era un virtuoso de ese instrumento y un maestro de la teoría musical. Su hijo también tocaba muy bien el laúd, así que pensaba en una melodía de ritmo vivo y cuando soltaba una bola para que rodara por un plano inclinado se ponía a tocar y paraba cuando la bola pasaba por una marca. Miraba en la partitura hasta dónde había llegado y contaba las notas musicales que había tocado, obteniendo así una medida bastante precisa del intervalo de tiempo transcurrido.

La evolución de los objetos en el espacio y en el tiempo se llama movimiento. Galileo se dio cuenta de que todos los movimientos (o casi) se pueden dividir en tres clases: el uniforme, el acelerado y el periódico, incluido en éste el circular. En el primero, el espacio que recorre el cuerpo en movimiento es directamente proporcional al tiempo. La constante de proporcionalidad se llama velocidad, de tal modo que en esta clase de movimiento la velocidad es el cociente entre el espacio recorrido por el móvil y el tiempo que tarda en recorrerlo. Es tan obvio que no hay que explicarlo. Nosotros la expresamos en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h) y Galileo en puntos por tempos (p/t). Un ejemplo de este tipo de movimiento es el que lleva a cabo una nave espacial con los motores apagados fuera de toda influen-

cia gravitatoria de planetas y estrellas. Éste, que parece el más simple y en la naturaleza es raro, es el único al que le prestó atención Aristóteles.

El segundo movimiento es el uniformemente acelerado. En este caso, la aceleración es el aumento (o disminución) de la velocidad dividido por el tiempo en que se produce o, dicho de otra manera, el espacio recorrido por el cuerpo es proporcional al tiempo al cuadrado. Un ejemplo de este movimiento es el de una piedra que cae sobre la superficie terrestre. A la aceleración que imprime la gravedad se la suele llamar g , precisamente en honor a Galileo, y de aquí la fórmula $e = gt^2/2$. A muchos lectores les aburren las matemáticas, pero no deben preocuparse, porque a Galileo le pasaba lo mismo.

Galileo leyó el lenguaje en que estaba escrito el libro del universo: las matemáticas. Pero las matemáticas del insigne profesor de la Universidad de Padua eran extraordinariamente rudimentarias: cuatro reglas y poco más. Por ejemplo, no utilizaba decimales, sino sólo los llamados números naturales: los enteros positivos. Por ello, por no preocuparse demasiado por las matemáticas, los textos de Galileo se hacen singularmente farragosos cuando trata de explicar los cálculos que ha hecho. Por ejemplo, todo lo hizo a base de proporciones, o sea, «si un cuerpo se mueve a tal velocidad... y otro a tal otra... la relación de tal y cual entre el primero y el segundo es el doble que si...». Un lío. Hoy día es cosa de niños, o sea, que se aprende en la más tierna infancia, aquello de que $e = vt$ en el movimiento uniforme y $e = at^2/2$ en el acelerado.

Para demostrar los errores de Aristóteles, a Galileo le bastó con tirar bolas desde una torre. Pero recuerde el lector que desmintió a Aristóteles, sí, pero las bolas no llegaban todas a la vez como él decía. Aquello le hizo pensar que tenía que estudiar el movimiento mucho más a fondo. Para Galileo, nunca se insistirá demasiado, estudiar significaba medir. Tenía que medir las distancias recorridas por las bolas y el tiempo que tardaban en hacerlo. Pero ¿cómo se mide exactamente la altura de la torre de Pisa con una regla de latón? ¿Y el tiempo que tarda la bola en caer con dos depósitos de agua o, lo que es peor, tocando el laúd? Entonces se le ocurrió lo del plano inclinado, uno de los experimentos más bellos de la historia.

El plano inclinado de Galileo no era más que un tablón de unos siete metros a lo largo del cual un carpintero le hizo una muesca a modo de canal. Este canal y sus bordes estaban muy bien pulidos e incluso engrasados para evitar el rozamiento lo máximo posible. El tablón se colocaba formando un cierto ángulo con el suelo. Aunque Galileo cambió este ángulo de inclinación muchas veces, no es del todo necesario. Galileo hacía marcas a distintas distancias y soltaba una bola desde cada una para que cayera rodando a lo largo de la muesca. Mientras tanto, abría el grifo del agua o se ponía a tocar el laúd. (Creo que le hubiera sido más fácil cantar la melodía.) En cuanto la bola llegaba al extremo inferior del tablón, o sea, al suelo, cerraba el grifo o dejaba de tocar. Traducía la cantidad de agua o las notas musicales a tempos y tomaba nota. Después de repetir la operación muchas veces para disminuir el error, cogía todas sus anotaciones y a la vista de ellas meditaba profundamente.

Galileo descubrió que el movimiento de la bola se puede descomponer: el movimiento horizontal por un lado y el vertical por otro. Los dos son uniformemente acelerados. Acababa así, sin saberlo, de poner las bases del concepto de vector.

Segundo descubrimiento. Si la bola se deslizara sin rodar, o sea, si no hubiera rozamiento entre la bola y el tablón, se cumpliría exactamente que la velocidad con que llega al suelo es proporcional al tiempo, $v = at$; sólo a partir de entonces, o sea, rodando la bola por el suelo, es cuando únicamente se cumple la regla de Aristóteles, porque si no hubiera rozamiento el movimiento sería uniforme y la bola se desplazaría indefinidamente a la misma velocidad. Si la bola no fuese ligeramente frenada por el aire de la habitación, se cumpliría exactamente que $e = at^2/2$. Así, Galileo acababa sin saberlo, de inventar los modelos físicos: condiciones ideales que permiten formular leyes exactas que después se someten a aproximaciones sucesivas para reproducir la realidad. La aceleración que imprime la Tierra a los objetos que caen es siempre la misma, independientemente del peso de los mismos, y es (en nuestras unidades), aproximadamente, de un aumento de la velocidad de 10 m/s cada segundo, o sea, 10 m/s². Ésta es la g de Galileo.

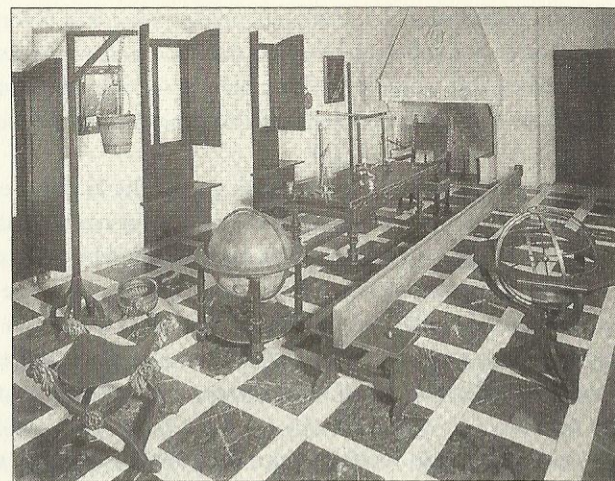


Figura 3.5. Reproducción del gabinete de Galileo en el Museo Técnico de Munich.

Muchos otros descubrimientos siguieron a este experimento: la expresión matemática de fenómenos, lo fructífera que es una medición precisa, etc., etc.

Si el lector desea emular a Galileo lo tiene muy fácil, porque puede construir un plano inclinado con panel de conglomerado, que es muy barato, y hacerle un canal adosándole a lo largo dos listones de pino, aunque, eso sí, debe utilizar papel de lija con brío y paciencia. Un poco de aceite de motor después del lijado disminuirá aún más el rozamiento. Las mejores bolas serían las de acero de buenos cojinetes en desuso. Yo recomendaría que no se utilizase el reloj de pulsera, que seguro que es digital y exacto, sino que se intentara con el agua o con la partitura de una canción que el lector conozca bien. Lo primero sería demasiado fácil; lo segundo es más divertido e instructivo, aunque más impreciso y bastante inviable si el lector no sabe solfeo.

Para llegar a las conclusiones de Galileo será suficiente con realizar cuatro medidas bien hechas de la siguiente manera. Se hacen marcas en

el tablón en el punto más alto, o sea, el correspondiente a la longitud máxima a recorrer por la bola, a $\frac{3}{4}$ de esa distancia, a $\frac{1}{2}$ y a $\frac{1}{4}$. Así, si el tablón que hemos construido es de algo más de seis metros, las marcas estarán a 600 cm, a 450 cm, a 300 cm y a 150 cm del extremo que apoya en el suelo.

Si el lector quiere empezar con una alegría, suelte la bola desde la primera marca y después desde la última. Con el reloj comprobará que la bola tarda en recorrer un cuarto del plano la mitad del tiempo que le cuesta recorrerlo completamente. Adiós a Aristóteles, porque este artista hubiera apostado la vida a que el tiempo que tarda la bola en recorrer una distancia es proporcional a dicha distancia, o sea, que desde la marca a seis metros habría tardado cuatro veces más que desde la marca a metro y medio.

Cada una de las cuatro medidas propuestas debería repetirse veinte o cincuenta veces, y extraer la media de todas ellas para disminuir el error. Si el lector es curioso y cuidadoso, hará bonitos gráficos con sus resultados y se sentirá muy satisfecho por haber emulado el invento de la física moderna y del método científico que define nuestra era.

4

Newton Descomposición de la luz del Sol

La biografía de Newton ha pasado por modas, lo cual es curioso, aunque tiene su lógica. Los dos extremos han sido ensalzarlo hasta extremos inauditos —como el «¡Hágase Newton! Y se hizo la luz» del poeta coetáneo suyo Alexander Pope— o demonizarlo hasta presentarlo como un monstruo. Hoy día estamos más bien inmersos en esta última tendencia de los historiadores. La lógica que subyace a estos enfoques tan opuestos es que estamos ante un personaje no ya singular, sino único. No es exageración: Newton es el intelectual más completo que ha dado la humanidad, y su obra la más decisiva para el devenir de la misma.

Voy a huir de la demonización de Newton como persona, aunque no dejaré aparte los aspectos negativos de su personalidad. Haré lo mismo que he hecho con los demás, en particular con Galileo. Pero estamos realmente ante un personaje muy lejano del polemista, amante del dinero y de las mujeres recias, vividor alegre y comedido que era el gran toscano: nos encontramos ante una persona de carácter retorcido. Aunque vamos a ver este aspecto de la personalidad de Newton, insisto en que lo que interesa de verdad es que su obra presenta tres cumbres jamás alcanzadas simultáneamente por ningún ser humano: la teoría, la experimentación y las matemáticas. El mismo Newton dijo, en un insólito y quizá único arranque de humildad, que si había llegado tan alto había sido porque se había subido a hombros de gigantes. Se refería a Arquímedes entre otros griegos excelsos, a Galileo, a Kepler, etc. Otros que siguieron a Newton, como Maxwell y Einstein, por citar a dos bastante populares, también dijeron cosas impresionantes de Newton (que no

voy a reproducir para no aburrir) porque sabían que ninguno de ellos reunía las habilidades del inglés. Einstein, por ejemplo, físico teórico cuya obra, dicho sin aspavientos, marcó el siglo XX, no era especialmente habilidoso con las matemáticas, y aunque dedicó once años de su vida a inventar algo tan prosaico como un frigorífico doméstico sin partes móviles, no lo consiguió. Maxwell, que sentó las bases de las telecomunicaciones con sus espléndidas ecuaciones, fue incapaz de llevar a cabo ningún experimento relevante. Ya hemos visto las limitaciones matemáticas que tenía Galileo. Nadie interpretó el libro de la naturaleza al que se refería Galileo de forma tan amplia y profunda como Newton. Por otro lado, posiblemente ningún intelectual alcanzó las cotas de neurosis y mezquindad a las que llegó Newton. ¿Qué importancia tiene la sombra que el carácter de un gran hombre pueda proyectar sobre su obra si su legado beneficia a la humanidad en su conjunto? ¿Disfrutamos menos del virtuosismo de un violinista si sabemos que tiene tendencias pederastas? Es un ejemplo sórdido y quizá desafortunado, porque Newton no era ningún pederasta, pero creo que puede ser ilustrativo. Al lector le interesará conocer estos desajustes aparentes del alma humana.

Newton nació el día de Navidad de 1642, justo el mismo año que murió Galileo, pero lo hizo en un hogar completamente diferente del acogedor e ilustrado que había formado el entrañable don Vincenzo Galilei. El acontecimiento tuvo lugar en la casa solariega de una buena granja situada en un pueblo, Colsterworth, que distaba unos cien kilómetros de Cambridge, la universidad que durante muchos años acogió a Newton. La segunda diferencia con Galileo es que Newton no conoció a su padre, también llamado Isaac, porque murió tres meses antes de nacer él. Había sido un hombre rico pero incapaz de escribir ni siquiera su propio nombre. El bebé de Hannah, la joven viuda de buen ver, era tan escuchumizado y enfermizo que, a la vista de los aterradores índices de mortandad infantil de la época, nadie se explicaba cómo sobrevivió al parto. Y no sólo eso, sino que vivió ochenta y cuatro años.

La granja empezó a ir mal, y de ella se tenían que alimentar bastantes personas, entre ellas los padres de Hannah. Una forma de aliviar la situación era que la viuda volviera a casarse. Lo hizo, cuando su hijo te-

nía apenas tres años, con el párroco del pueblo vecino, el reverendo Barnabas Smith, de la parroquia de North Witham. Éste, muy piadosamente, pensó: esposo nuevo, vida nueva, y que aquel niño tan feo se lo quedaran sus abuelos, que él iba a dar mejores crías. Un niño y dos niñas hermosos y sanos tuvo Hannah con el cura.

La madre de Newton aceptó alejarse del pequeño Isaac, pero, como se verá, una madre es una madre, y Hannah nunca dejó de querer a su hijito. Los que no lo debieron de querer tanto fueron sus abuelos, porque, por una parte, Newton jamás los mencionó, y, por otra, su abuelo, que murió cuando Newton contaba diez años, no le dejó ni un chelín.

Así pues, la infancia de Newton fue más bien desgraciada, y dejó una prueba escrita de ello. En una lista de pecados cometidos en la infancia que elaboró cuando tenía diecinueve años (en aquella época los ingleses hacían este tipo de cosas) había uno que decía: «Amenazar a mi madre y a mi padre Smith con prenderles fuego y quemar después la casa con ellos dentro».

Pero desde su punto de vista tuvo suerte: el padre Smith se murió de repente el mismo año que el abuelo. El cura había ido compensando a los abuelos del niño por aguantarlo pagando numerosas reparaciones de la finca familiar, por lo que a la nuevamente enviudada Hannah no le pesó volver a Woolsthorpe junto a su hijito abandonado. De pronto, el joven Newton se encontró con una extraña familia: su abuela, su madre, un hermanastro y dos hermanastras. El niño cogió tal berrinche que tuvieron que enviarlo urgentemente a Grantham, pueblo que tenía una escuela de gramática y que distaba unos ocho kilómetros de Woolsthorpe. Aunque estuviera tan cerca, Newton, de doce años, se alojó en casa del boticario del pueblo, un hombre llamado Clark. Poco se sabe de este Clark y su familia, porque cuando Newton ya fue insigne, se refirió a él una sola vez en sus escritos mencionándolo exclusivamente así: Clark. El caso es que lo que sí impresionó mucho a Newton fueron las retortas, los botes y los alambiques con que el boticario preparaba sus mejunjes y medicinas, sobre lo cual escribió mucho, pero al boticario le prestó poca atención. Lo que sí se sabe de Clark es que, como veremos, siempre ayudó a Newton.

La escuela de gramática de Grantham era tan desastrosa como la mayoría de las escuelas europeas de la época: se enseñaba gramática, o sea, a leer y escribir, un poco de latín, menos de griego y mucha religión. Nada de matemáticas y otras zarandajas. Así, no es de extrañar (y poco desdice del nuevo alumno de doce años) que pronto estuviera entre los últimos de la clase. Epítetos que le dedicaron por escrito sus maestros fueron: soberbio, taciturno, distraído y haragán.

Hay dos cosas que han llamado mucho la atención de los biógrafos de Newton en aquellos cinco años de Grantham. Todos están de acuerdo en que el chaval apenas entabló relación más que con las niñas y que les fabricaba ingeniosos artefactos. A estos dos hechos les dan interpretaciones que van de un extremo a otro. Sobre el primero hablan de homosexualidad incipiente y de debilidad de carácter. Sobre el segundo, de que construyó norias tiradas por ratones, muebles para casas de muñecas y, lo más curioso, un vehículo de cuatro ruedas movido por un manubrio y que podía girar, o sea, un automóvil en el que Newton podía pasear a las niñas; las interpretaciones van desde la genialidad hasta la holgazanería del muchacho. Seguramente, cuando el lector termine de leer estas pinceladas sobre la vida de Newton estará de acuerdo conmigo en que en la época de Grantham el joven era ingenioso y poco más, y en que lo de las niñas era circunstancial.

Cuando Newton terminó sus estudios (es un decir) en Grantham, a los diecisiete años, regresó a la casa de su madre; ella se puso muy contenta porque necesitaba que alguien dirigiera aquella magnífica granja. ¿Quién mejor que su hijo mayor? Además, para dirigir una granja hay que ser más listo que trabajador, y justo eso era su Isaac. Para que aprendiera, Hannah le puso un empleado veterano, honrado y paciente para que no se separara de él en todo el día. Aquello fue un desastre tal que a los pocos meses la madre le dijo a su hijo que hiciera lo que le diera la gana con tal de que no molestara en las tareas de la granja.

La señora vio el cielo abierto cuando recibió la visita de John Stokes, director y dueño de la escuela de Grantham. Curiosamente, en aquella ocasión no iba a quejarse de algún desaguisado cometido por Isaac (éste a menudo pegaba a los niños más débiles), sino que le pro-

ponía enviarlo otra vez a la escuela para preparar su ingreso en Cambridge. Pero ¿no estaba hartado del niño? Sí, pero los no residentes en Grantham pagaban cuarenta chelines más que los residentes, y había muy pocos. Hannah, digna madre de su hijo, no tenía un pelo de tonta, y como se dio cuenta de las verdaderas razones de la oferta del señor Stokes, consiguió una sustancial rebaja de la matrícula de Isaac. A pesar de ser una mujer de posibles, Hannah era ahorradora. El tal Stokes, por cierto, era un tipo más agradable y buen profesional de lo que pudiera parecer por lo único que he dicho de él. De hecho, enseñó un montón de cosas a Newton, entre otras los *Elementos* de Euclides.

En 1661, siendo algo mayor que el promedio de sus compañeros, Isaac Newton ingresó en el Trinity College de la Universidad de Cambridge. Aquí se abrió una nueva etapa de su vida, pero sus tendencias neuróticas, su inseguridad (que lo mantenía en un constante estado de ansiedad) y sus arranques irracionalmente violentos (que marcaron sus años de infancia y adolescencia) le acompañarían toda su vida.

Para colmo, ya fuera por la tacañería de su madre o como castigo por los estropicios cometidos a causa de su inutilidad como granjero (y su mala intención), Newton ingresó en el college como sirviente. Esta condición, destinada a estudiantes brillantes pero pobres, era bastante humillante porque los fámulos tenían que servir cada uno a un estudiante rico, y los menos pobres de los pobres servían para el college. Newton fue de los primeros, pero pronto se apañó para servir a un primo lejano suyo al que tenía totalmente dominado y atemorizado.

Cambridge, como todas las universidades de la época, estaba impregnada hasta el tuétano de aristotelismo. Pero Copérnico, Kepler y, sobre todo, Galileo le habían hecho críticas tan demoledoras al pobre griego que ya se hablaba con desparpajo de la naturaleza como una maquinaria intrincada, impersonal e inerte. Sobre todo gracias al filósofo francés Descartes. Semejantes extravagancias no entraban en los planes de estudios de las universidades europeas, pero Cambridge fue una de las muchas que permitieron a los estudiantes más avanzados ir a conferencias y seminarios sobre las nuevas teorías. De 1664, cuando Newton estaba en el tercer y último curso de la carrera, data una frase

suya que se hizo famosa y que anotó en un cuaderno de apuntes destinado a ejercicios de escolástica: «Amicus Plato amicus Aristoteles magis amica veritas» («Platón es mi amigo, Aristóteles es mi amigo, pero mi mejor amiga es la verdad»). No está mal, porque Platón y Aristóteles tenían poca cosa que ver con la verdad, pero sobre todo porque la frase demostraba que Newton, para fortuna de todos nosotros, iba a ir por libre. De todas formas, Newton indica en la frase que no renegaba del todo de Platón y Aristóteles, y esto le llevó, como veremos, a una grave esquizofrenia, por si al carácter de Newton le hicieran falta más ingredientes. Así, Newton, siendo el más grande artífice de la ciencia moderna, que en esencia es la antítesis de lo mágico y sobrenatural, no dejó de transitar por la azarosa senda de la filosofía hermética y el ocultismo, de manera que, entre otras extrañas actividades, fue alquimista y astrólogo a lo largo de toda su vida. Con la primera faceta alcanzó cumbres inimaginables; con la segunda, por supuesto, no aportó absolutamente nada, ni relevante ni irrelevante.

También en aquella época empezó a interesarse por las matemáticas, en particular a través de *La Géometrie* de Descartes. En poco más de un año, Newton estudió todos los libros de matemáticas modernas de la época, lo cual dice mucho a favor de la biblioteca de Cambridge, porque no le faltó ni uno y hay constancia de ello, entre otras cosas porque todavía están allí. Estudiaba matemáticas de una manera acorde a su carácter neurótico: copió (aunque también puso bastante de su propia cosecha) más de mil quinientas páginas que después reunió en unos extravagantes volúmenes titulados *Artículos matemáticos*. Durante meses, se pasó la noche y el día estudiando y escribiendo matemáticas. Se convirtió así, sin duda alguna, en el mejor matemático del mundo, el más creativo y el más prolífico, aunque sólo lo supieran muy pocos colegas de la universidad.

El año que terminó la carrera y obtuvo el título de bachiller ocurrió algo importante: por toda Inglaterra se desató una epidemia de peste bubónica. Fue tan furibunda y se le temía tanto que una de las medidas que se tomaron fue cerrar la universidad y de este modo dispersar a alumnos y profesores, pues nada hay tan grato a una plaga

como las concentraciones de gente. Newton se fue a Woolsthorpe con su familia.

Durante aquellos dos años, para Hannah y los demás Isaac hizo lo único que sabía, el haragán, pero para el resto del mundo lo que hizo fue alumbrar el más maravilloso producto del cerebro humano. A lo largo de toda su vida, Newton fue el único inglés que recordaba con cariño y añoranza aquellos dos nefastos años.

Durante esos «años milagrosos», como él llamaba a 1665 y 1666 estableció, para pasmo de todos, las bases del cálculo infinitesimal, la teoría del color y la gravitación universal. Realmente, hoy debemos acordar con él que aquella peste no produjo sólo estragos, como era lo habitual.

A esa época pertenece la anécdota de la manzana; aunque no es verídica, hay que decir que quien se inventó la mentirijilla fue él mismo: ya en su edad adulta, contó en varias ocasiones que estando en la granja, sentado bajo un manzano, al caer uno de los frutos vio la Luna y se preguntó por qué no se caía igual que la manzana. Pero hoy sabemos cómo llegó Newton a concebir la ley de la gravitación universal, y fue un proceso genial, sin duda, pero parsimonioso y muy elaborado. Ya hablaremos de todo esto; creo que el lector disfrutará refrescando, de manera un tanto diferente y enmarcado en su contexto histórico, algo que le enseñaron en el instituto y que probablemente haya olvidado. Pero ahora sigamos con los avatares de la vida de Newton.

Él sabía desde pequeño que era genial. ¿Cómo se sentía después de aquellos dos años maravillosos? Como el genio más grande del mundo, y, para colmo, con razón. Todo genio demanda reconocimiento, pero no siempre lo consigue; no fue el caso de Newton. Poco a poco veremos que Newton tuvo enemigos formidables, lo cual no es de extrañar por razones obvias, pero es notable cuánta gente lo apreció de veras. Isaac Borrow fue uno de ellos.

Superada la epidemia, Newton volvió a Cambridge para ver si se podía quedar, porque ya tenía claro lo que quería hacer en la vida, y eso lo facilitaba más una universidad que una granja. La única vía era obtener una beca del Trinity, pero el college sólo ofrecía nueve y el número

de candidatos era enorme. Haber sido fámulo estudiando a su aire no ayudaba lo más mínimo. Aun así, obtuvo una de las nueve becas. ¿Por qué? Porque el boticario Clark lo recomendó a un profesor del Trinity amigo suyo. A partir de entonces, un catedrático de matemáticas recién llegado (en realidad obtuvo la cátedra en 1663, pero con el asunto de la plaga apenas si se notó) se dio perfectamente cuenta de que Newton era genial. Se trataba de Borrow. A Newton le aumentaron la beca al año siguiente, y en 1668, con veintisiete años, heredó la cátedra de Borrow por decisión de éste (así se hacían las cosas entonces). Borrow, como después el propio Newton, había considerado que eso de ser catedrático en Cambridge no estaba mal, pero que era poca cosa. Se convirtió en capellán real en Londres. En aquella época, para ser profesor fijo en Cambridge había que dejar constancia clara y asidua de la lealtad a las creencias anglicanas y terminar ordenándose sacerdote. Lo primero lo hacía Newton sin problemas en artículos y escritos, pero lo de ser cura... El problema era que Newton, en privado, se había convertido en un hereje. Y su herejía, siendo catedrático del Trinity, era nada menos que no creer en la Santísima Trinidad, con lo que tenía un porvenir más que oscuro en aquella universidad. Pero de nuevo Borrow le ayudó desde su influyente puesto en la corte. Sabedor de las pocas ganas de ser ordenado clérigo que tenía su protegido, y sin indagar la causa, consiguió que se derogara la exigencia tradicional, que no ley, de ser sacerdote para ser profesor de matemáticas en Cambridge.

Ya tenemos a Newton en toda su gloria: amargándole la vida a los estudiantes con su mal genio y sus clases ininteligibles y sistematizando todas las geniales intuiciones que había tenido durante su retiro en el campo. O sea, publicando. Es notable que hoy la trayectoria académica sea la inversa: se empieza publicando a mansalva y se llega a catedrático, el que llegue, después de ganar unas oposiciones muy concurridas y a una edad bastante madura. Newton, además, le tenía bastante fobia a publicar, pero sus libros fueron fascinantes, como veremos.

Aunque en principio no le conocía nadie, lo que empezó a hacer famoso a Newton no fue ninguno de los tres prodigios que hemos comentado: el cálculo, la luz y la mecánica analítica. Se dio a conocer con

un telescopio, pero ¡qué telescopio! Ya hemos visto que el telescopio lo inventaron los holandeses y que Galileo construyó el suyo con la ayuda de un excelente artesano. Newton diseñó su telescopio de manera original y lo fabricó con sus propias manos. En lugar de lentes utilizó un espejo.

Trabajando con prismas, que son el objeto de este capítulo, Newton se dio cuenta de que la pobreza de las imágenes de los telescopios del tipo de los de Galileo era debida a que los bordes de las lentes actuaban como prismas, y que por eso aparecían círculos y franjas coloreadas que distorsionaban los objetos. Ya entonces a tal efecto se le llamaba «aberración cromática». Así que nada de lentes. Newton diseñó el montaje que puede verse en la figura 4.1 y la aberración cromática se esfumó.

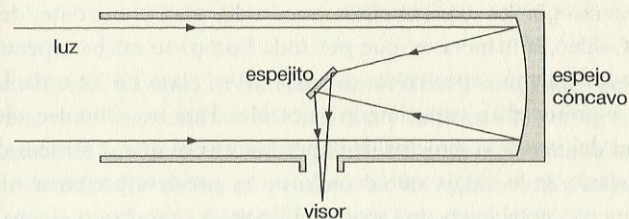


Figura 4.1. Esquema de funcionamiento del telescopio de Newton, que en lugar de lentes, usa un espejo cóncavo para focalizar la luz de un objeto lejano.

El problema estaba en fabricar un espejo cóncavo de curvatura constante y exacta. Lo mejor era hacerlo de metal, y Newton fabricó una aleación basada en el cobre que era una maravilla, aunque la humedad del espantoso clima inglés la oxidaba con facilidad. Con una delicadeza extraordinaria, Newton fabricó un telescopio (llamado «reflector» porque el espejo simplemente reflejaba la luz de un objeto alejado) de apenas quince centímetros que conseguía cuarenta aumentos, el equivalente a un telescopio refractor (tipo Galileo) de metro y medio de longitud. Y sin aberración de ningún tipo.

A decir verdad, el diseño de Newton no había sido completamente suyo, porque un profesor de matemáticas escocés, James Gregory, había publicado un diseño similar unos años antes aunque no había llegado a construirlo, ya fuese porque no sabía cómo hacerlo o porque no había encontrado un buen artesano.

El caso es que Newton presentó su telescopio en la insigne Royal Society. Merece la pena mencionar lo que era en aquella época la recientemente fundada Royal Society. Sus miembros eran hombres ricos, lores y algún que otro obispo que se reunían de forma periódica y, cómodamente sentados, discutían de los asuntos más peregrinos: las costumbres de los habitantes de un país lejano, las manchas solares, las deformidades de algún recién nacido, la dilatación de los sólidos al calentarse, un pez petrificado, la variación en volumen de un ácido al disolver en él un metal, y cosas así. Desde el principio, los miembros sentían especial predilección por los experimentos, pues todos eran conscientes de que, desde Galileo, la manera en que por toda Europa se estaba superando a Aristóteles era con experiencias tangibles. Pero claro, no en todas las sesiones se presentaban experimentos notables. Para no aburrirse, crearon la figura del *curator*, o director de experimentos, al que, a cambio de un buen salario, se le exigía que cuando no se previera presentar ningún experimento notable en una sesión, él llevara a cabo tres o cuatro. Casi nada. Esta ardua tarea la tenía asignada entonces Robert Hooke, que muy pronto se convirtió en enemigo acérrimo de Newton.

La enemistad entre ambos era inevitable. Hooke hacía experimentos magníficos y construía aparatos extraordinarios. Sirvan los siguientes ejemplos: fue el primero en colocar un resorte en espiral a los relojes, invento tan decisivo para construir el reloj que tan ansiosamente buscaban los marinos para determinar la longitud, construyó una bomba de vacío excelente, y, sobre todo, su microscopio hizo historia porque le dio fama a la Royal Society con un delicioso libro llamado *Micrographia* donde, con la ayuda de un dibujante profesional, mostraba el inédito mundo de la anatomía de los insectos, del crecimiento de los órganos más íntimos de las flores, etc. Además, era un buen geólogo y un eficiente arquitecto (véase la figura 4.2).

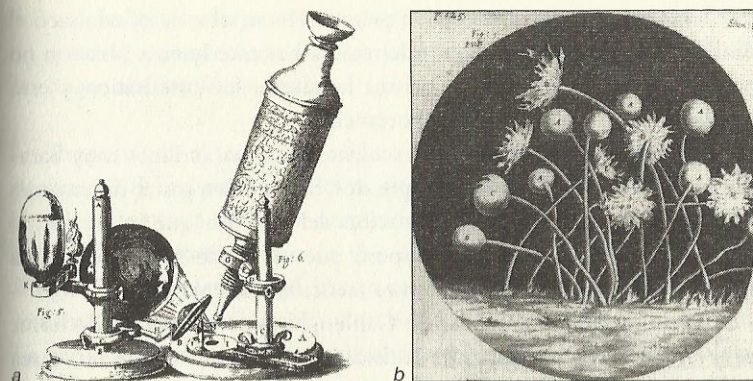


Figura 4.2. El microscopio de Hooke (a). Microfotografía obtenida con el microscopio de Hooke (b).

Pero Hooke no tenía ni idea de matemáticas y su carácter era, simplemente, el opuesto del hurraño, secretista y taciturno Newton: era alegre, amante de la vida en sociedad, publicista de todo lo que se le ocurría y reivindicador de ser el primero en inventarlo todo, lo cual, al ritmo que le imponía la Society, no era de extrañar.

Hooke, por supuesto, dijo que el telescopio reflector ya lo había inventado él, pero no dio mucha batalla con esto porque estaba cantado que la Royal Society iba a reclutar a Newton y no era cosa de jugarse el puesto sin saber antes con quién se enfrentaba. Hooke se dio cuenta de que las simpatías hacia el recién ingresado eran escasas y se lanzó contra él a la primera ocasión. Y esa ocasión fue el bello experimento de la descomposición de la luz del Sol.

Descartes, en su libro *Météorologie*, describe las virtudes y el uso del prisma para estudiar la formación del color. En época de Newton, no era raro encontrar prismas de vidrio en algunas tiendas, porque se usaban como juguetes. Variaban de precio en función de dos factores que no eran claramente visibles: la presencia de burbujas e inhomogeneidades, por una parte, y que los tres lados no fueran exactamente iguales,

por otro. Newton se hizo con un prisma. No se sabe de dónde sacó el dinero para comprarlo, porque además era bastante bueno. Newton no pudo comprarse un segundo prisma hasta que fue catedrático, y esto habría de tener una enorme importancia.

Hoy día pueden comprarse excelentes prismas acrílicos muy baratos; invito al lector a que se compre dos. Si no desea gastar dinero, más adelante le propondré una explicación del arco iris que se basa en el mismo principio que el prisma pero que se puede realizar con una simple botella. Pero ahora prestemos atención a los prismas.

Como decíamos al hablar de Galileo, lo peor que se puede hacer para entender a los clásicos de la física es leerlos: se trata de una tarea casi imposible. Para mí es un misterio insondable que al crear una teoría o modelo se utilicen una notación y una concatenación argumental farragosas. Con el tiempo, el mismo autor u otros, si el artículo o libro tuvo trascendencia, desbroza el asunto y lo aclara de manera meridiana. Salvando las distancias, por supuesto astronómicas, hice recientemente una limpieza en mi despacho y encontré manuscritos míos escritos hacía veinte o veinticinco años, y me costó mucho entender algunos de ellos. Para colmo, Newton era un crítico vocacional, por lo que su obra cumbre, los *Principia*, fue más admirada, incluso venerada, que leída. Así que, dicho esto, paradójicamente no he visto manera mejor de explicar al lector el experimento del prisma que dándole la palabra al propio Newton, porque por una vez en su vida fue claro. En una carta al presidente de la Royal Society se puede leer:

Para cumplir la última promesa que le hice, le informaré sin más ceremonia que a principios del año 1666 me procuré un prisma de vidrio triangular para tratar el célebre fenómeno de los colores con él. Para ello oscurecí mi habitación y practiqué un pequeño agujero en el cierre de mi ventana que dejara pasar una cantidad conveniente de luz del Sol. Coloqué mi prisma a su entrada de manera que se refractara desde allí hasta la pared opuesta. Al principio fue una diversión muy placentera ver los colores vivos e intensos producidos, pero después de un rato considerán-

dolos más circunspectamente, quedé sorprendido al verlos en una forma oblonga, porque de acuerdo con las leyes de refracción, hubiera esperado que tuvieran forma circular.

Proporciono al lector en la figura 4.3 un esquema delicioso del experimento del mismísimo Voltaire, que realizó en 1728.

Ni se le ocurra al lector, inspirado por esta figura, repetir la experiencia de Newton, porque lo más que obtendrá será una deplorable imagen casi circular del Sol, blanca casi toda ella, con un ligero enrojecimiento en el borde superior y un tímido tono violáceo en el inferior. La pared opuesta a la de la persiana del agujero tras la cual puso Newton el prisma estaba, aunque no se lo dijera al presidente, «a veinte pies», o sea, a casi siete metros. Hágalo así el lector y verá la maravillosa descomposición de la luz del Sol en los colores del arco iris.

¿Esto fue todo? ¿Con esto le dio Newton otro golpe a las teorías de Aristóteles? Si esto hubiera sido todo, Hooke habría refutado a Newton, y por supuesto lo intentó. Pero vayamos por partes.

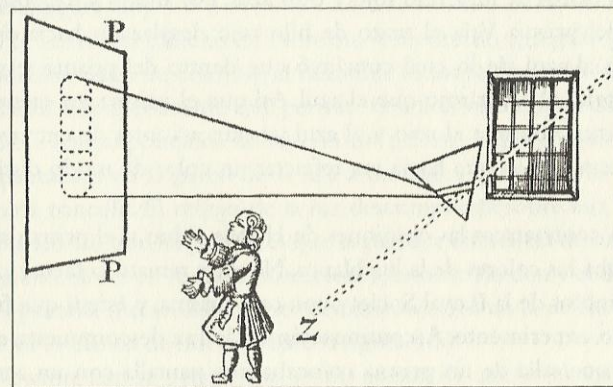


Figura 4.3. Ilustración de Voltaire, amigo de Newton, para explicar la descomposición de la luz por el prisma.

En esta primera fase del experimento, Newton sólo entreveía dos posibles conclusiones: el color es una cualidad que la luz recibe del prisma, o bien la luz es una mezcla de todos los colores del arco iris y el prisma lo único que hace es separarlos. Por cierto, el lector ha de intuir que dilucidar esto y aclarar el enigma histórico del arco iris debe ser más o menos la misma cosa.

Descartes, curiosamente, opinaba que era el prisma el que provocaba que la luz se coloreara. Aunque la idea de Descartes pueda parecer peregrina, no lo es. Era la siguiente, explicada en términos muy esquemáticos pero correctos: la luz se componía de partículas que giraban o podían girar. Al entrar en el vidrio del prisma, se ponían a girar o, en cualquier caso, cambiaba su velocidad de rotación. Este cambio era lo que le daba color.

Newton contrarrestó esta idea con un argumento casi igual de peregrino: cuando una bola gira, su trayectoria en un medio dado tiende a curvarse (el famoso «efecto» en las pelotas de ping-pong o los balones de fútbol); por el contrario; la luz que salía descompuesta del prisma iba en línea completamente recta. Esto no satisfacía ni al propio Newton, así que hizo otra cosa genial a pesar de su simplicidad: le robó a Hannah dos trozos de hilo, uno rojo y otro azul. Los anudó y los observó a través del prisma. Veía el trozo de hilo rojo desplazado hacia delante respecto al azul, de lo cual concluyó que dentro del prisma se movía más deprisa el color rojo que el azul. Así que el prisma no «generaba» color alguno porque el rojo y el azul ya eran así antes de entrar en él, de manera que lo que hacía era refractar un color de modo distinto a otro.

Para contraatacar las opiniones de Hooke sobre si el prisma creaba o separaba los colores de la luz blanca, Newton remató la faena, ya ante los miembros de la Royal Society, con otro prisma, y éste sí que fue un hermoso experimento. A continuación de la luz descompuesta en sus colores que salía de un prisma colocaba una pantalla con un agujero. Girando el prisma con la mano, hacía que por el agujero pasara el color que quisiera. Colocaba otra pantalla con otro agujero a unos tres metros de la primera. Por este segundo agujero salía luz del color elegido,

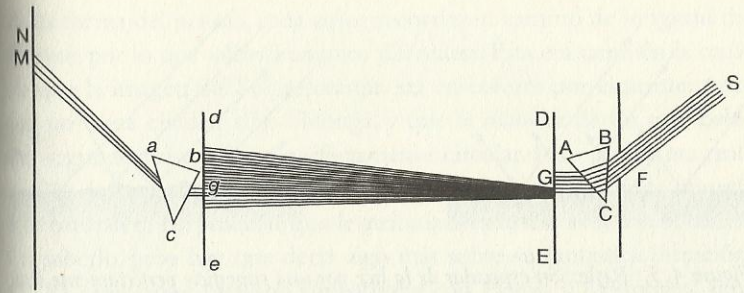


Figura 4.4. Esquema del experimento con dos prismas.

digamos el verde. Ésta se hacía pasar por el segundo prisma y se proyectaba sobre otra pantalla. La mancha que aparecía era verde y nada más que verde, y además, circular y no oblonga, como ocurría con el primer prisma. Y así con todos los colores. Lo único que hacía el segundo prisma era cambiar la dirección del haz de luz monocromático. Los colores estaban en la luz del sol, y los prismas no hacían más que lo que indicaba el experimento con los hilos de colores: separar unos de otros (véase la figura 4.4).

Si la luz es, en palabras de Newton, «un confuso agregado de rayos de todas las clases de colores», al reunirlos todos se obtendrá de nuevo luz blanca. El experimento que permite concluir esto no puede ser más sencillo. Descomponemos la luz con un prisma, la proyectamos sobre otra pantalla o en la pared de la sala a oscuras y cerca de ella colocamos una pantalla. El reflejo de la luz descompuesta sobre esta pantalla será blanco. Lo que ha pasado es que la pared, a diferencia de un espejo, refleja los colores en todas las direcciones, éstos se funden y al llegar a la nueva pantalla (no se debe poner demasiado cerca de la de los colores) la luz ya es blanca de nuevo (véase la figura 4.5).

Newton, con su perspicacia, se dio cuenta de que le faltaba por explicar el proceso de visión del ojo humano. El oído, sin ir más lejos, parece mucho más refinado, ya que es capaz de distinguir dos notas musicales emitidas simultáneamente, mientras que el ojo no es capaz de

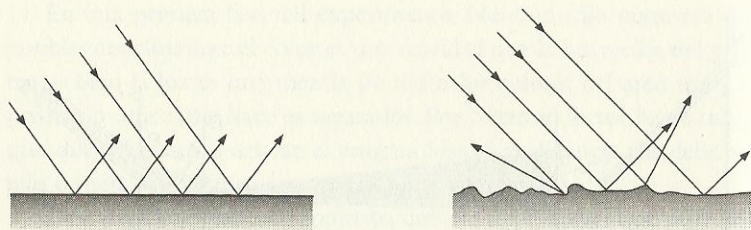


Figura 4.5. Reflexión especular de la luz por una superficie perfectamente lisa, de la que salen los rayos paralelos entre sí, y una superficie rugosa, que difunde los rayos en todas las direcciones de forma aleatoria.

discriminar los colores de que está compuesta la luz blanca. Aún peor: si una persona se esconde de otra tras una esquina, no se ven, aunque se pueden oír. Hizo falta un siglo más para empezar afrontar el problema seriamente, y dos para explicarlo bien.

Lo que sí indagó Newton, con astucia y la ayuda de los prismas, fue el juego de los colores. Por ejemplo, si proyectaba un color, digamos el azul, sobre un objeto azul, se veía azul. Pero si el mismo objeto era iluminado con el rojo, se veía negro. El lector puede hacer esto con un prisma, girándolo con la mano como antes, y con una pantalla agujereada. ¿Qué es lo que pasa? Pues que el objeto es azul, o sea, lo vemos azul, porque refleja sólo este color, que es el que llega a nuestros ojos. Los demás son absorbidos. Si el objeto es iluminado con otro color, no refleja ni dicho color, puesto que es absorbido, ni el azul, porque no le llega, de tal modo que vemos el objeto de color negro.

Todo esto está muy bien, pero Newton sabía que descubrir que la luz del Sol estaba formada por «rayos» de distintos colores era avanzar poco en el conocimiento de la naturaleza de la luz. ¿Qué eran esos rayos?

Muchos de sus contemporáneos, en particular el gran Huygens (del que hablaremos más adelante) concebían la luz como una onda, esto es, de modo similar al sonido. Lo que ocurría en el prisma era que cada color era una onda de distinta longitud de onda (distancia entre dos valles o dos crestas) que en el vidrio viajaban a distinta velocidad. A causa

de la forma del prisma, cada color recorría un camino de longitud diferente, por lo que salían a ángulos diferentes. Ésta era también la causa de que la imagen del Sol descompuesta en colores por el primer prisma no fuese circular sino oblonga, y que la mancha de un solo color del segundo prisma fuese perfectamente circular. Pero ¿la luz era realmente de naturaleza ondulatoria y por tanto tan radicalmente opuesta a la naturaleza corpuscular que le atribuía Descartes? Newton se murió sin saberlo, pero hay que decir algo más sobre su fantástica intuición.

Ya vimos que Newton simpatizaba con Platón y Aristóteles, aunque los relegara frente a la verdad. Pero si la verdad se le resistía, ¿por qué no acudir a ellos? Y aquí Newton se enredó bien enredado, y como no podía ser de otra manera: metiendo a los dos griegos por medio. Entre mucha *teoría, hipótesis, esencia y sustancia* y ningún experimento, concluyó que la luz estaba formada por pequeñas partículas. Ya veremos al final de este libro hasta qué punto acertó.

Con todo esto y mucho, muchísimo más, Newton escribió su libro *Opticks*. Como nunca tuvo prisa por publicar, el libro no vio la luz hasta 1704. Una de las muchas cosas que contiene *Opticks* es la explicación completa del arco iris, que seguro que al lector le interesará, ya que ha llegado hasta aquí en cuanto a la descomposición de la luz solar.

¿No es el arco iris uno de los espectáculos naturales más hermosos? Pero quizá el lector no se ha percatado de todos sus aspectos, así que me voy a permitir recordarle lo que ve en realidad. Tras una lluvia intensa, en el horizonte opuesto al Sol surge un arco perfecto formado por una franja de colores coronados por el rojo. Si se midiera esta última franja se comprobaría que forma, en todas direcciones desde el punto de vista del observador, un ángulo de unos 42 grados (véase la figura 4.6).

Éste es el llamado «arco iris primario». Si el día se pone bueno de verdad, por encima de este arco aparece otro, llamado «secundario», menos brillante y, además, con el orden de los colores invertido: la última franja es azul tirando a violeta y la primera roja. Entre el arco primario y el secundario el cielo está perceptiblemente más oscuro que por debajo del primero y por encima del segundo. El ángulo formado por éste es de unos 52 grados.

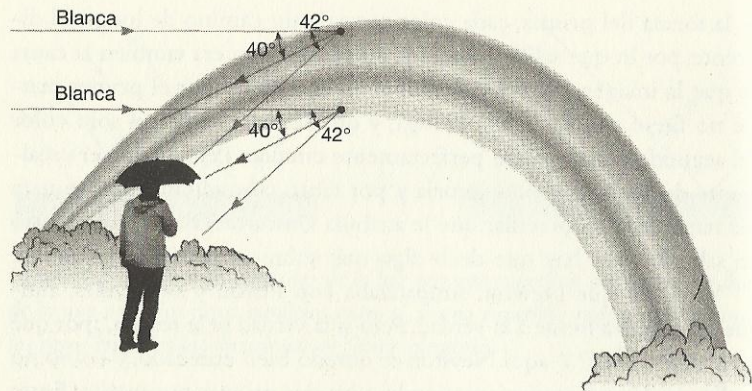


Figura 4.6. Formación del arco iris primario. (Figura tomada del libro de Serway y Beichner citado en el texto).

Naturalmente, semejante espectáculo llamó la atención de todos los científicos desde los tiempos más remotos. Referirme otra vez a Aristóteles me da pudor, porque el lector puede pensar que lo mío con él es pura inquina. Es cierto, pero no porque haya tenido más fallos que aciertos. Aristóteles dio una explicación bastante elaborada del fenómeno del arco iris. Muestro un dibujo suyo para que se me considere justo, ya que, como puede verse, puso su interés en la dirección acertada.

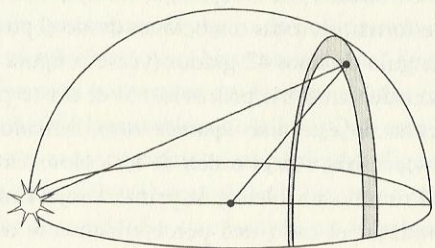


Figura 4.7. Esquema de Aristóteles para explicar la formación del arco iris.

El fallo de Aristóteles en esta ocasión era que decía que el arco iris se formaba por el reflejo de la luz del sol en la superficie de una nube. Un dominico llamado Dietrich, o sea, Teodorico, siguiendo las ideas de san Alberto Magno, dejó escrito que el arco iris se entendería cuando se supiera lo que una sola gota de agua hacía con la luz del Sol. Además, hizo notar que el arco iris no sólo aparecía después de la lluvia, tras lo cual suelen quedar nubes, sino que también se formaba cerca de las fuentes, en las cascadas e, incluso, en las gotas de rocío matutino atrapadas en una tela de araña. No hacían falta nubes para nada. El dominico vivió en el siglo XIII, lo cual implica que nadie empezó a cuestionarse las extravagantes ideas del griego hasta mil setecientos años después de su muerte. Soy consciente de que la culpa no es de él, sino del uso que se hizo de su obra durante tantísimos siglos, pero el lector entenderá que, a falta de análisis más profundos sobre el aristotelismo a lo largo de la historia (algo que me veo completamente incapaz de hacer), de vez en cuando me ensañe con él.

La explicación del arco iris que remató Newton la habían iniciado de manera acertada muchos, en particular, una vez más, Descartes. Muestro los diagramas de ambos, tomados del *Météorologie* de Descartes y el *Opticks* de Newton (véase la figura 4.8).

Sigamos el consejo del dominico Teodorico y tratemos de explicar lo que hace la luz del Sol cuando sus rayos encuentran una sola gota de agua en un ángulo determinado. Como en el prisma, la luz se descompone en el agua. Una parte sale de ella y otra parte se refleja en la cara interna de la gota, es decir, rebota. Hace lo mismo a un cierto ángulo y, finalmente, escapa de la gota en una dirección determinada. Esta luz que emerge descompuesta en sus colores es la que ve el observador (véase la figura 4.9).

Después de un aguacero, en el aire hay infinidad de gotas de diversos tamaños. Sin embargo, sólo el conjunto de todas las que forman el mismo ángulo incidente con los rayos del Sol se disponen formando un arco perfecto. Se trata de pura geometría. Éste es el arco iris primario.

El arco secundario lo forman las gotas que se disponen en otro determinado ángulo esto es, según la figura. Obsérvese que en este caso

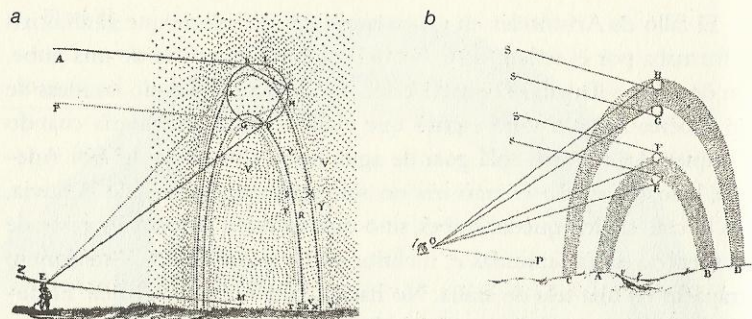


Figura 4.8. Esquema de Descartes para explicar la formación de los arcos iris primario y secundario (a). Esquema de Newton análogo al de Descartes (b).

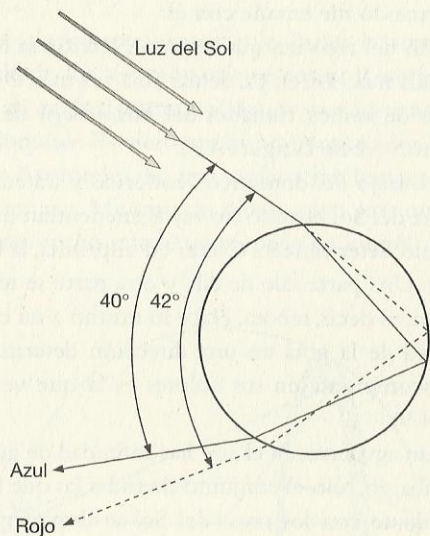


Figura 4.9. Detalle del recorrido de dos rayos extremos (azul y rojo) refractados por una gota de agua que da lugar al arco iris primario.

hay más reflexiones y refracciones, esto es, se pierde más luz de la incidente que llega al observador. Por eso el arco iris secundario, si llega a verse, es más débil. Además, obsérvese por qué el orden de los colores está invertido respecto del primario (véase la figura 4.10).

La tenue oscuridad entre un arco y otro es debido a que las gotas que hay entre ellos dispersan la luz hacia atrás más que hacia delante, como hacen las que están por debajo del primario y por encima del secundario. Ya tenemos explicado cualitativamente el fenómeno. Su análisis cuantitativo, es decir, matemático, no es trivial pero se ha hecho hasta en ámbitos no meteorológicos, como por ejemplo en el de los núcleos atómicos.

Invito al lector a que repita lo que hizo el monje Teodorico para ver lo que le ocurría a la luz al incidir en una gota de agua. De este modo comprenderá también el experimento del prisma si ha optado por no comprarse uno.

Como Teodorico no disponía en su celda de gotas que pudiera manejar cómodamente, y menos aún de un recipiente esférico lleno de agua, que sería lo más apropiado, utilizó una botella. La simetría esférica y la cilíndrica tienen ciertos aspectos comunes, como se puede imaginar. Lo que es imprescindible en el experimento es que la habitación esté a oscuras, que el rayo de luz esté bien colimado (es decir, que pase

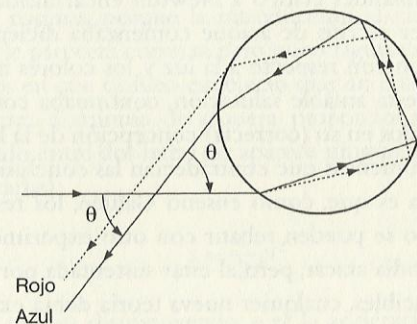


Figura 4.10. Detalle del recorrido de los rayos de luz en una gota en la formación del arco iris secundario.

a través de un agujero pequeño) y, lo más importante, que el vidrio de la botella sea lo más fino posible. A partir de aquí sólo hace falta paciencia y suerte.

¿Y qué pasó con Newton después de estos maravillosos experimentos? Pues que su fama aumentó y, paradójicamente, su carácter continuó agriándose. A Hooke lo despreciaba, y sus disputas con él lo alegraban más que otra cosa, sobre todo porque siempre le vencía. Pero apareció en escena un personaje que fue un hueso mucho más duro de roer para Newton, entre otras cosas porque en muchos sentidos era su álder ego: el holandés Huygens. Era tan parecido a Newton (aunque no en carácter) que no se entiende muy bien por qué no pasó a la posteridad con la misma fuerza que el inglés. Huygens dominaba las matemáticas de su época y hacía experimentos y desarrollos técnicos y conceptuales en infinidad de campos. Sólo cometió un gran error, no aceptar la ley de gravitación universal de Newton, pero todo lo demás estuvo casi al mismo nivel establecido por él. Hoy en día se le reconoce en los libros de óptica, pero no en los de otras disciplinas. Una explicación a su escaso tránsito a la posteridad era que, como Newton, Huygens trabajaba solo y odiaba publicar. Y en su caso, a diferencia de Hooke, sí que hay constancia de que numerosos descubrimientos de la física de los siglos XVII y XVIII atribuidos a otros en realidad son debidos a Huygens. Este holandés criticó a Newton encarnizadamente a pesar de que su primer escrito de ataque comenzaba diciendo: «La teoría del señor Newton con respecto a la luz y los colores me parece muy ingeniosa». Tras esta amable salutación, continuaba con una serie de argumentos basados en su (correcta) concepción de la luz como frentes de ondas, argumentos que contradecían las conclusiones de Newton. El problema es que, como enseñó Galileo, los resultados de un experimento sólo se pueden rebatir con otro experimento. La teoría de Newton se podía atacar, pero al estar sustentada por experimentos fiables y reproducibles, cualquier nueva teoría debía explicar sus propios resultados. Eso no lo hizo Huygens, y así le fue. Pero amargó a Newton porque sabía que era uno de los grandes científicos de su época.

La otra gran polémica de Newton la estableció con otro científico de su talento pero alemán, o sea, aún más pertinaz que él. Se trataba de Leibniz, un grandioso personaje que no sólo se dedicaba a las matemáticas sino que hacía de todo, y todo bien, menos pisar una universidad. Como jurista, por ejemplo, diseñaba reformas de leyes, como genealogista elaboraba el pedigrí de las familias reales, como diplomático participaba en todos los tratados de paz, y como matemático inventó el cálculo infinitesimal. Pero ¿no habíamos dicho que esto lo hizo Newton? Lo hicieron los dos, cada uno por su lado y de manera distinta, pero desembocando en ese mismo grandioso mar del conocimiento humano. Por supuesto, la autoría de dicho descubrimiento fue origen de una amarga y virulenta disputa hoy ya aclarada. El problema surgió por la manía de Newton de no publicar más que a regañadientes.

Las pocas páginas que siguen contienen algo de matemáticas, pero cualquier lector puede seguir las si presta atención. Si su animadversión a las fórmulas lo hace insuperable, puede saltarse la parrafada y seguir leyendo tan campante el transcurso de la curiosa vida de Newton. En cualquier caso, estoy seguro de que su esfuerzo se verá recompensado porque se explicará el origen del portentoso cálculo moderno, entenderá por qué se sintió mortificado en las clases de matemáticas del instituto y que ambos genios no llegasen a las manos... Si el lector está familiarizado con las matemáticas a cierto nivel, también puede saltarse las siguientes páginas, porque la introducción al cálculo infinitesimal que suponen le parecerá correcta pero poco rigurosa.

Quedamos en que Galileo estableció que un cuerpo caía de manera que la altura disminuía de manera proporcional al cuadrado del tiempo (cuando entre dos letras no aparece ningún símbolo es que hay que multiplicarlas):

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

s es la altura que va disminuyendo, g es la aceleración de la gravedad denominada así en honor a Galileo, como dijimos, y que vale $9,8 \text{ m/s}^2$, (de tal modo que, debido a dicha aceleración, la velocidad del cuerpo

que cae aumenta 9,8 metros por segundo cada segundo, y t es el tiempo transcurrido. Recuerdese también que Galileo usaba solamente números naturales. Así, para el tiempo sólo se podría medir un segundo, dos segundos, tres segundos... O como hacía él, con la unidad que definió: un tempo, dos tempos, tres tempos... Pero el tiempo fluye de manera continua, ¿verdad? Newton y Leibniz se dieron cuenta de que la esencia del movimiento era la variación continua. Otra manera de intuir esta sutileza es que, por ejemplo, para describir el tiempo sería esencial expresar la evolución de manera que se pudiera definir en cada instante. Esto parece cosa de filósofos, y lo fue, pero observe el lector la suave y portentosa transición de la filosofía a las matemáticas que se produce en este desarrollo teórico.

Supongamos que la bola que cae desde la torre de Pisa está a una altura s en un instante t . Inmediatamente después, está a una altura (definida desde el punto de la torre desde la que se ha dejado caer la bola hasta el suelo) que llamaremos $s + ds$, y al tiempo transcurrido lo denotaremos $t + dt$. ¿Qué significa inmediatamente? Pues que ds y dt son tan pequeños como se quiera. O simplemente muy pequeños. Apliquemos otra vez la fórmula de Galileo cuando la bola ha avanzado ese poquito:

$$s + ds = \frac{1}{2}g(t + dt)^2$$

Recuerde el lector que una suma al cuadrado no es la suma de los cuadrados, y si no compruébelo mentalmente (3 más 2 al cuadrado suma 25, muy diferente de 9 + 4, que suma 13).

$$s + ds = \frac{1}{2}g[t^2 + 2tdt + (dt)^2]$$

lo cual se puede escribir de esta manera:

$$s + ds = \frac{1}{2}gt^2 + gtdt + \frac{1}{2}g(dt)^2$$

Vemos que de nuevo aparece a uno y otro lado del igual la expresión de Galileo $s = gt^2/2$.

Lo eliminamos en las dos partes y nos queda:

$$ds = gtdt + \frac{1}{2}g(dt)^2$$

Como dt (léase diferencial de t) es muy pequeño por definición, $(dt)^2$ es muchísimo más pequeño (piénsese que 0,0001 al cuadrado es 0,00000001). Así pues, se puede despreciar. Tenemos, por tanto, que:

$$ds = gtdt$$

Si ahora dividimos a ambos lados del igual por dt obtenemos:

$$\frac{ds}{dt} = gt$$

Al cociente entre el espacio recorrido por un móvil y el tiempo empleado en ello lo llamamos velocidad, de manera que si un coche recorre cuarenta kilómetros en media hora, decimos que ha llevado una velocidad de 80 km/h. Pero esto es una velocidad media. La que resulta de dividir un espacio tan pequeño como ds en un intervalo de tiempo también pequeñísimo, dt , la llamamos «velocidad instantánea». Como puede suponerse, ésta es mucho más descriptiva del movimiento.

$$v = \frac{ds}{dt}$$

Al cociente entre dos magnitudes diferenciales se le llama «derivada», y a las ecuaciones que las contienen «ecuaciones diferenciales». Así pues, ya tenemos la expresión de cómo cambia el espacio con respecto al tiempo, o la velocidad, de un móvil. Naturalmente, lo que nos va a interesar es sumar toda la descomposición que hemos hecho en intervalos pequeños. A esa suma se la denota con un símbolo llamado «integral», que no es más que una S alargada:

$$\int ds = \int gtdt$$

Ya sabemos que la suma de todos los pequeños intervalos de espacio es el espacio completo; en el caso de la bola que cae, la distancia que ha recorrido desde que fue soltada:

$$\int ds = s$$

Y la del otro lado del igual ya nos dijo Galileo lo que valía:

$$\int g dt = \frac{1}{2} g t^2$$

El lector poco avezado en matemáticas se preguntará qué hemos adelantado descomponiendo el movimiento en intervalos pequeños para después integrarlo todo y llegar al punto de partida. Hemos dado un paso gigantesco, porque hemos encontrado un método prodigioso para analizar cualquier tipo de movimiento y, en general, de cambio. Lo que hacemos físicos y matemáticos (con aplicaciones a infinidad de campos, como las variaciones de las especies en un hábitat biológico o la evolución de una enfermedad) es plantear ecuaciones diferenciales e integrarlas después.

Pues esto es lo que inventaron Newton y Leibniz. La notación que hemos seguido, o sea, llamar «derivada» al cociente de dos diferenciales denotados con la letra d delante de la variable, se debe a Leibniz. Newton las llamaba «fluxiones» y las representaba con un punto encima de la letra de la variable. El caso es que no lo publicó cuando lo descubrió, y ésa fue la causa de la tremenda disputa sobre la autoría entre ambos científicos.

Pero, como hemos visto, Newton no sólo tuvo enemigos formidables, sino también amigos magníficos. Uno de ellos fue Edmond Halley, el profundo y cuidadoso astrónomo que dio nombre al más célebre cometa.

Halley había sido un hombre bastante rico, pero se casó y tuvo una familia numerosa, por lo que su riqueza se hizo relativa. Por eso combinaba sus observaciones astronómicas con un puesto de administrador de la Royal Society por el que obtenía un modesto salario de cincuenta libras anuales. En cierta memorable ocasión, fue de Londres a Cambridge

a entrevistarse con Newton. Iba, lógicamente, bastante preocupado, porque conocía al ilustre sabio y había oído hablar de su carácter. Newton lo recibió y le escuchó como águila que observa a su presa. La pregunta de Halley al maestro fue la siguiente: «Señor, he descubierto que los planetas se ven atraídos por el Sol siguiendo una ley de cuadrado inverso a la distancia, ¿qué trayectoria ha de seguir un cuerpo sometido a una fuerza así?». Para pasmo de Halley, Newton respondió sin pestañear: «Una elipse». «¿Podría, podría...?» «Espere un momento, joven.» Newton empezó a rebuscar entre su inmensa maraña de papeles y al rato le dijo: «Eso lo demostré hace mucho tiempo, pero, como no encuentro los papeles, lo escribiré de nuevo y se lo enviaré a Londres».

Halley se fue de Cambridge confuso. Por una parte, Newton no había sido amable, pero tampoco un ogro. Por otra, ¿sería verdad que había demostrado aquello, o simplemente se lo había quitado de encima? ¿Le enviaría lo prometido? A los pocos meses, cuando Halley ya estaba descorazonado, recibió un fajo de papeles que lo dejaron anonadado. Newton los titulaba *De motu corporum in gyrum*, «Sobre el movimiento de los cuerpos en órbita».

Recordemos uno de los fallos de Galileo. Johannes Kepler fue contemporáneo suyo y, basándose en los prodigiosos datos del astrónomo real danés Tycho Brahe, publicó tres leyes empíricas sobre las trayectorias de los planetas, la primera de las cuales era que seguían trayectorias elípticas. Galileo, por culpa de algún residual ramalazo aristotélico, no creyó en ello porque la elipse no tenía la belleza y la perfección del círculo. Halley comprobó que Kepler llevaba razón; pero ¿qué provocaba una trayectoria elíptica?

La fuerza centrípeta (que atrae hacia el centro), que varía con el inverso del cuadrado de la distancia, implica que, si dos cuerpos están separados por una distancia r y sienten una fuerza F , cuando se les separa al doble de distancia la fuerza se debilita cuatro veces más; si la distancia es el triple, la fuerza disminuye nueve veces, y así sucesivamente. Es decir:

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

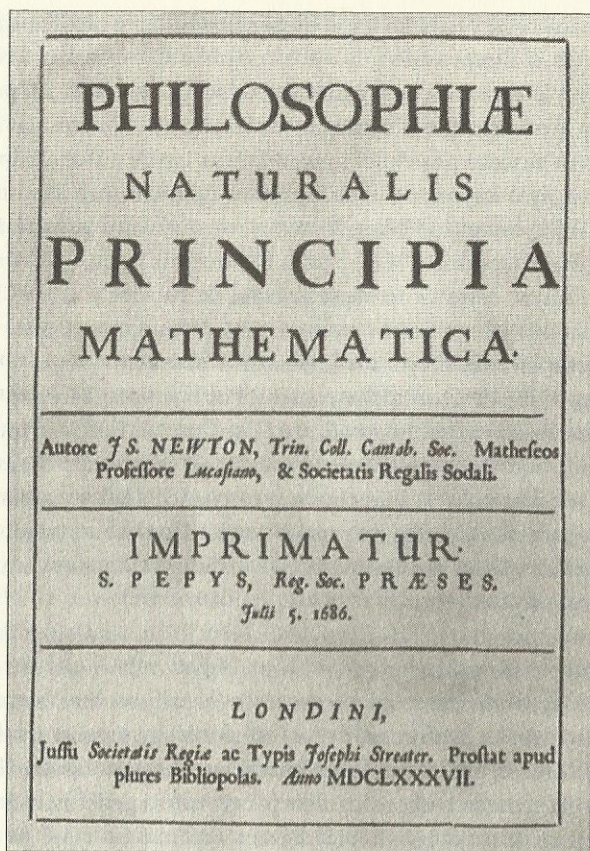


Figura 4.11. Portada de la primera edición de los Principia de Newton.

donde el símbolo significa «proporcional a». Una fuerza de estas características, como hemos visto, era la que Halley creía que actuaba entre el Sol y los planetas. La gran cuestión era si una fuerza así provocaba una trayectoria elíptica. Newton no sólo lo demostró en su *De motu*, sino que explicó a la perfección las tres leyes de Kepler.

Halley transmitió su entusiasmo a Newton de manera que éste se enfrascó en los problemas que conllevaban las fuerzas y los movimientos y, después de algo más de dos años de trabajo febril y obsesivo, convirtió el *De motu* en tres libros que sumaban más de quinientas páginas en total y que son, posiblemente, la obra cumbre de la física: *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, «Principios matemáticos de filosofía natural», conocidos simplemente como los *Principia* (véase la figura 4.11).

Como ya he mencionado, los *Principia* son casi ininteligibles a causa del carácter de Newton. Las fluxiones, o las derivadas e integrales de Leibniz, las había inventado Newton unos veinte años antes, pero no había publicado nada sobre ellas. ¿Cómo iba a escribir la obra de su vida, tan revolucionaria, en un lenguaje del que nadie había tenido noticia y teniendo, para colmo, que utilizar la notación de su odiado Leibniz? No, lo mejor era hacerlo a la antigua usanza, o sea, geoméricamente. Las quinientas y pico páginas incluían trescientas cuarenta figuras, la mayoría de ellas inextricables. Además, usaba un lenguaje muy oscuro; por ejemplo, lo que hoy llamamos «momento p », que no es más que el producto de la masa de un cuerpo m por su velocidad v (magnitud fundamental en la dinámica, puesto que en algo se tienen que diferenciar un tren y una moto que van exactamente a la misma velocidad) y que simplemente expresamos así

$$p = mv$$

Newton la definía de esta manera: «La cantidad de movimiento es la medida de la misma, que surge conjuntamente de la cantidad de materia y la velocidad». La fuerza, que no es más que la fluxión (derivada) del momento, o sea,

$$F = \frac{dp}{dt}$$

la definía de una manera aún más complicada.

Con definiciones de este estilo, variación de las cantidades definidas, gráficos por doquier e innumerables párrafos, Newton dedicaba el primer libro de los *Principia* al movimiento de los cuerpos sin resistencia; el segundo, el menos importante y el más oscuro, al movimiento de los cuerpos en medios materiales, o sea, sometidos a resistencia, y el tercero, la parte culminante, al «sistema del mundo», es decir al movimiento de los planetas y sus lunas bajo el imperio de la ley de gravitación universal. La proporcionalidad que tanto preocupaba a Halley era:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

siendo m_1 y m_2 las masas de los cuerpos 1 y 2 que se atraen y G una constante universal, es decir, independiente de todo, a determinar. Si una de esas masas es la de la Tierra, la otra la de una manzana y la distancia entre ellas el radio de la Tierra, tenemos que:

$$F = G \frac{M_T m}{R_T^2} = mg$$

De este modo obtenemos el valor de la aceleración g introducida por Galileo y bautizada así en su honor. ¿No es fantástico? La Luna no cae sobre la Tierra como la manzana porque, en virtud de uno de los principios de Newton, a toda fuerza se le opone una igual pero de sentido opuesto (si empuja una pared, ésta me empuja a mí igualmente, si no, o cae el muro o me caigo yo). La fuerza opuesta a la centrípeta atractiva de un cuerpo en órbita es una centrífuga (la que empuja a un coche hacia fuera en una curva) que la equilibra. Para que la manzana no cayera como la Luna, tendría que estar en órbita.

Con este tercer libro hubo sus más y sus menos, como siempre pasaba con Newton. En abril de 1686, los manuscritos de los dos primeros libros ya estaban listos y en poder de Halley. Tan entusiasta fue el astrónomo funcionario de la Royal Society que empezó a divulgarlos por todas partes. Lo hacía, sobre todo, para animar a la Royal Society a que los publicase. Aquello costaba un dineral y la sociedad estaba prácticamente en bancarrota. Halley hizo cálculos para pagar la publicación

de su bolsillo, pero con tanta prole que alimentar no le alcanzaba ni de lejos. Entonces intervino el dicharachero Hooke clamando que la ley del cuadrado inverso a la distancia la había descubierto él y que en el tercer libro, ya anunciado por Halley, Newton tenía que reconocerlo por escrito. Newton respondió a su manera: la publicación de los dos primeros libros le importaba un pimiento, y el tercero simplemente no se publicaría. Menos mal que Halley era paciente y diplomático y consiguió convencer a Newton, que, de manera incomprensible, sentía simpatía por él. Tan bien le caía que, cosa extrañísima, le dedicó este cálido agradecimiento en el epílogo de los *Principia*: «En la publicación de este trabajo, el más agudo y universalmente reconocido Mr. Edmond Halley no sólo me ayudó a corregir los errores de imprenta y a preparar las figuras geométricas, sino que fue gracias a su solicitud por lo que se ha publicado». Lo que no sabía Newton era que además Halley al final tuvo que financiar la publicación con su magra fortuna. Pero se recuperó económicamente, porque la primera edición de los *Principia* no tardó en venderse por toda Europa, aunque casi nadie entendiera su contenido.

Por supuesto, la publicación de la magna obra despertó infinidad de controversias a las que Newton entraba como un áspid cuando entreveía en ellas la más ligera crítica. Sin embargo, el carácter belicoso del maestro hizo que no todas sus disputas fueran estériles para él: una de ellas obtuvo un magnífico final.

En febrero de 1685 subió al trono Jacobo II, que se había convertido al catolicismo quince años antes. Como a todo converso, le entró una furia evangelizadora desmedida, y la manera que un rey tenía de evangelizar era a base de situar a católicos en puestos influyentes. Empezó por el ejército, porque los protestantes anglicanos lo habían apoyado y se habían sentido traicionados al ver las intenciones del nuevo rey. Sentirse traicionado va acompañado de organizar rebeliones, y para sofocarlas está el ejército. Pero después, Jacobo II continuó colocando católicos como jueces y funcionarios de todas clases. Hasta que intentó nombrar a un benedictino en Cambridge, seguramente porque nadie le puso sobre aviso de que allí había un tipo de cuidado. ¿Cómo reac-

cionó Newton ante el desaguisado de nombrar catedrático a alguien que no había pasado ningún tipo de examen? Formándole tal escándalo público al rector que a éste le dio más miedo Newton que el propio rey; así que rechazó al benedictino.

Resultó que Guillermo de Orange, invitado por infinidad de políticos ingleses, organizó un ejército para invadir Inglaterra y echar al rey. Éste vio cómo su ejército se quedaba en cuadro porque casi todos los anglicanos desertaron y se quedaron apenas los mandos católicos que él había nombrado, por lo que tuvo que poner tierra por medio (en realidad el agua del canal de la Mancha, porque se fue precisamente a Francia). Newton se convirtió en un héroe, aunque el mérito hubiera sido del pobre rector. En cuanto los nuevos reyes, Guillermo y María, fueron coronados, nombraron a Newton parlamentario en virtud a su valía como científico (ya era muy famoso, y en toda Europa se le consideraba el mejor matemático del mundo) y su probada fidelidad.

Estas pinceladas de la vida y la obra de Newton quedarían muy incompletas si no se hace mención de una actividad que llevó a cabo durante treinta años: la alquimia.

Desde los más remotos tiempos, los alquimistas buscaban la transmutación de las sustancias. Lo hacían como lo han hecho los hombres curiosos de todas las civilizaciones: buscando placer en el puro conocimiento y, como la mayoría de ellos, también el reconocimiento de los demás y el beneficio personal que pudieran conllevar sus descubrimientos. El problema con los alquimistas es que, por una parte, no buscaban el fundamento de su ciencia (de nuevo, aunque al lector le parezca obsesivo por mi parte, mucha culpa de ello la tuvo que todos tuvieran predilección por Aristóteles en lugar de, por ejemplo, Demócrito y los atomistas). Por otra parte, el beneficio último que perseguían era nada más y nada menos que prolongar la vida y transmutar metales ordinarios en oro. Si se piensa bien, el sueño de los alquimistas no distaba mucho del de los científicos modernos: vencer las enfermedades y aumentar, en general, el bienestar social. Curiosamente, la medicina actual ha conseguido doblar la esperanza de vida de la población desde el siglo XVII; en cambio, en una ocasión calculé que obtener un gra-

mo de oro mediante reacciones nucleares con un acelerador costaría unos veinte mil euros, cuando su precio en el mercado es de unos diez euros.

Conseguir oro y prolongar la vida llevaba a los alquimistas al secretismo. Newton no había renunciado del todo a Aristóteles, y la actividad secreta le iba a su carácter como anillo al dedo. Del despacho de Newton se conservaban 138 libros de alquimia que había ido reuniendo, pero hasta el siglo XIX no se descubrió que entre la inmensa cantidad de papeles que había dejado había una vasta colección de manuscritos, diarios de laboratorio, recetas e infinidad de pliegos copiados de libros y documentos alquimistas. El pasmoso descubrimiento lo hizo un biógrafo de Newton llamado David Brewster. Éste calculó que Newton había recopilado más de un millón de palabras manuscritas en torno a la alquimia. También se descubrió otro testimonio de un ayudante suyo llamado, curiosamente, Humphrey Newton (no era pariente suyo). De una manera muy fragmentada, se podía leer lo siguiente del tal H. Newton acerca de su maestro: «Una gran satisfacción y placer ... El fuego [en los hornos del laboratorio] apenas se apagaba ni de día ni de noche ... su esfuerzo, su diligencia en aquellos duros momentos, me hacían pensar que él quería llegar más allá de lo que puede alcanzar el arte y la industria humanos».

Newton no consiguió nada relevante con aquel ímprobo esfuerzo. Quizá, siendo generoso, se le puede atribuir el concepto de afinidad química a raíz de a su «principio de sociabilidad de las sustancias», pero poco más, porque pretendía que esta afinidad se basaba en fuerzas que seguían una ley del inverso del cuadrado de las distancias, lo cual está muy lejos de describir cómo interaccionan las moléculas en realidad.

Otra actividad secreta que llevó a cabo Newton fue el estudio de la teología, principalmente de las Sagradas Escrituras. Empezó con la historia de la Iglesia, y como resultado de todo este esfuerzo lo único que aportó fue que lo de la Santísima Trinidad era una corrupción doctrinal introducida en el siglo IV y que antes el dogma era totalmente unitario.

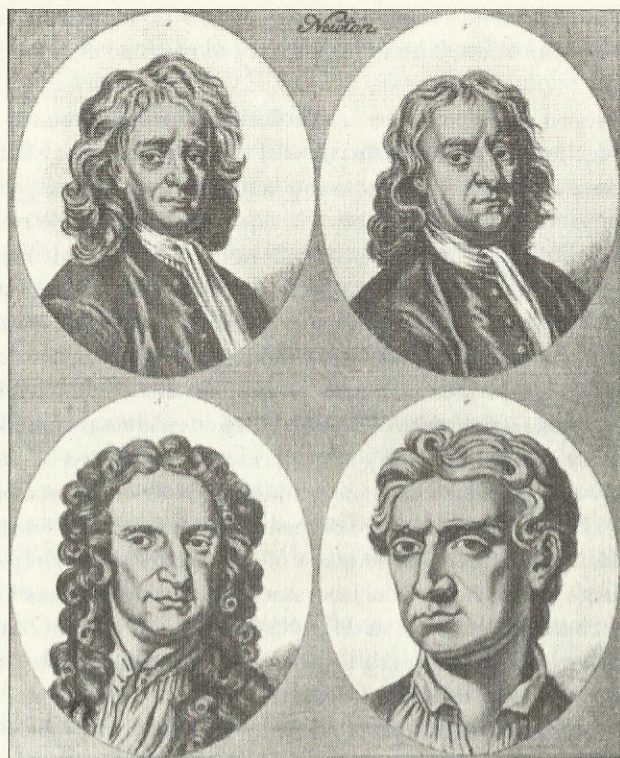


Figura 4.12. Isaac Newton en diversas edades. Grabado de J. H. Lips.

¿Y qué decir de la vida sentimental de Newton? Como el lector puede imaginar, para aderezar e ilustrar en su contexto histórico las maravillosas experiencias que son el objeto de este libro he consultado numerosas biografías y he extraído de ellas lo que me ha parecido más importante y entretenido. De Newton es del personaje que más biografías he reunido, y este aspecto sentimental, que considero interesante pero poco relevante, es el que encuentro más controvertido en todas ellas. Lo califican de homosexual o, como mínimo, de misó-

gino. Cualquier consideración en este sentido se basa en tres datos conocidos.

Newton, como es lógico teniendo en cuenta su carácter y su forma obsesiva de trabajar, sufrió dos ataques de nervios muy serios en su vida. El más fuerte lo sufrió al terminarse la profunda amistad que mantuvo con un joven matemático suizo residente en Londres que se llamaba Fatio de Duillier. Otros biógrafos achacan el ataque al envenenamiento por su actividad alquimista, a sus problemas religiosos, a las frustraciones puntuales pero acumuladas producto de sus investigaciones, a dormir poco y mal sempiternamente, etc. Opino que los síntomas que aparecen descritos en las primeras biografías que se le hicieron apuntan más bien a depresiones periódicas con dos ataques agudos en fase esquizofrénica a causa de simultanear éxitos científicos y fracasos alquimistas. Pero si como historiador tengo inmensas limitaciones, como psiquiatra soy una nulidad. Lo que sí parece fuera de duda es que la desaparición de Fatio de la vida de Newton le afectó profundamente. ¿Es esta la prueba definitiva de su homosexualidad?

El otro hecho en que se basan los historiadores que indagan sobre este aspecto es que Newton nunca se casó. Pero esto lo considero otra débil prueba porque, en primer lugar, tanto en Oxford como en Cambridge el celibato entre sus profesores era obligatorio hasta entrado el siglo xx. Y, en segundo lugar, ¿qué mujer iba a aguantar a un tipo como Newton de marido y a qué mujer iba a estar dispuesto éste a atender lo más mínimo?

En cuanto a su misoginia, hay un dato divertido y significativo: la relación que tuvo Newton con su media sobrina, la hija de su hermanastra Hannah, llamada Catherine Barton. Ya hablaremos de ella, porque esto pertenece a la época de Londres.

A los cincuenta y cuatro años, Newton decidió dejar la cátedra en Cambridge, la ciencia, la alquimia, la teología y dedicarse a vivir bien. Como puede imaginar el lector, ha habido infinidad de interpretaciones de este cambio tan radical. Yo creo que a Newton le pasó lo que a todos los que nos dedicamos a la investigación, algo que difícilmente admitimos: llega una edad en que las neuronas flaquean. Así, como sue-

na. Es (debe de ser) la misma sensación que tienen los deportistas cuando ven que su voluntad empieza a ir más allá que sus fuerzas. El hecho es que Newton había sido nombrado parlamentario, y aquello, junto a su amistad con Fatio y sus relaciones con la Royal Society, le había llevado bastantes veces a Londres. ¿Dónde podía pasar mejor lo que le quedaba de vida que en la City? Aquí entra en juego otro admirador y amigo de Newton: Charles Montague, que era nada menos que ministro de Finanzas. Había sido alumno suyo en Cambridge y, según algunos historiadores, amigo más que íntimo. Montague ofreció a Newton el puesto de guardián de la moneda con la advertencia de que aquello era una sinecúra, o sea, que le proporcionaba un magnífico sueldo a condición de que no hiciera nada de nada. Pero en cuanto Newton pisó la Casa de la Moneda, empezó a comprar libros de finanzas, comercio y economía y a estudiar como loco. Para colmo, su jefe, el director de la ceca, era un especulador nato que cumplía a pies juntillas el carácter honorario del cargo: cobrar el sueldo y dedicarse a engrosar su fortuna. Pero éste murió, por lo que Newton se vio de pronto dueño y señor de la Casa de la Moneda y (lo que más le gustó) con un tremendo problema por delante.

En Inglaterra había dos clases de monedas: unas acuñadas a base de martillazos de troqueles sobre una plancha, y otras hechas por una maquinaria más moderna que (dicen que el artificio fue idea del propio Newton) producía ranuras en el borde (este tipo es el que ha llegado hasta nuestros días). Las primeras se podían limar y con las virutas de oro fundirlas en nuevas monedas. Las segundas no, porque la ausencia de ranuras delataría el fraude. Además, las primeras eran fáciles de falsificar, y se temía que pronto empezaran a falsificarse las segundas. Naturalmente, las hechas a martillazos eran las que circulaban, y las bien acuñadas se guardaban. Aquello era un problema, y Newton lo abordó con ganas y éxito mayúsculo. Pronto las nuevas monedas fueron difícilmente falsificables, las viejas desaparecieron y la represión a que fueron sometidos los falsificadores fue terrible y disuasoria. El cargo daba a Newton la facultad de ordenar la tortura y el ahorcamiento de los reos, y parece que lo hacía con frecuencia y saña.

En aquella época apareció por casa de Newton su sobrina Catherine. Esto, curiosamente, le encantó tanto a Newton que le ofreció vivir en su casa, que se convirtió pronto en la meca de un montón de admiradores para, de manera increíble, mayor complacencia del huraño tío. Tan guapa y tan frívola era la sobrinita que pronto se convirtió en amante del ministro Montague, con la aprobación entusiasta de Newton.

El ministro murió, dejando a su novia clandestina una fortuna más que considerable. La pena le duró poco a Catherine, porque no tardó en establecer relaciones con el escritor Jonathan Swift, el cual la alabó mucho en algunas de sus obras. El gran Voltaire, que era un entusiasta admirador de Newton y de espíritu alegre, dejó escrito anacrónicamente: «Yo creo [...] que Newton ha hecho su fortuna por sus propios méritos [...] no hay duda de ello. Pero tenía una muy encantadora sobrina [...] que conquistó al ministro Halifax [Montague]. Fluxiones y gravitación no habrían tenido utilidad alguna [para Newton] sin una bonita sobrina». Ahí queda eso. La sobrina no perdió el tiempo, y terminó magníficamente casada con un millonario que se convirtió en uno de los primeros biógrafos de Newton: John Conduitt.

La Casa de la Moneda funcionaba como una seda; en cambio, la Royal Society no levantaba cabeza. ¿Quién mejor que Newton para reformarla e impulsarla? Nadie, así que ya tenemos de vuelta al insigne científico en el mundo de la ciencia.

Naturalmente, como presidente le dio una vida insospechada a la sociedad. Pero también la utilizó de forma artera para reemprender sus disputas con nuevos bríos. Además de dar la cara en las discusiones con quien se le pusiera entre ceja y ceja, organizaba comisiones para dilucidar las controversias en su contra, que siempre presidía él.

El 16 de abril de 1705, la reina Ana otorgó a Newton el título de sir en una ceremonia celebrada en el Trinity College. Tal honor le hacía absoluta justicia, pero se debió a la influencia de Montague más que a sus inmensos méritos, de los que la reina apenas tenía noticia.

Con la edad y los achaques, empezó a preocuparse de la terrible imagen que dejaba tras él. Comenzó a encargarse retratos y a distribuir su

riqueza entre familiares y allegados. Tras una serie de enfermedades propias de la edad, murió en el 31 de marzo de 1727 y fue enterrado en Westminster con todos los honores. De él dejó dicho uno de sus colaboradores: «Newton tenía el temperamento más temible, cauteloso y suspicaz que nunca he conocido». Sin embargo, quizá la oda más apropiada que se hizo de él provino del gran Halley, que, en el prefacio de una edición de los *Principia*, que tanto le debían a él, escribió que Newton había llegado a estar «más cerca de los dioses de lo que ningún mortal se puede aproximar».

5

Cavendish

La constante de gravitación universal

Biot, un conocido físico francés, definió a Cavendish como «el más rico de todos los sabios y el más sabio de todos los ricos». Yo creo que, deseando ser ingenioso, Biot cayó en una imprecisión injusta y casi absurda. Ser más sabio que los ricos no tiene gran mérito: es cuestión de dedicar al estudio el mismo afán y tiempo que dedican aquéllos a acumular riquezas. Cavendish fue más sabio no sólo que todos los ricos, sino también que la inmensa mayoría de los ilustrados de su generación. Además, y esto es lo más importante, asociar las virtudes de Cavendish a la riqueza no es decir mucho, porque si algo le importaba poco era precisamente su inmensa fortuna.

Henry Cavendish, el más británico de los británicos, nació en Francia. Pero no en cualquier parte, claro, sino en Niza, porque a qué otro sitio de Francia iban a ir lord Charles Cavendish, hijo del duque de Devonshire, y lady Anne Gray, hija de la duquesa de Kent, sus padres. El acontecimiento tuvo lugar al final del veraneo de 1731, que se prolongó hasta bien entrado octubre porque la madre no estaba bien de salud. De hecho, a causa del siguiente parto, el de Frederick, que tuvo lugar dos años después, lady Anne murió. Así pues, tenemos al primogénito de una escueta familia descendiente de la más alta aristocracia cuyos linajes se remontaban varios siglos: la época de los normandos.

Si Newton nació el mismo año que murió Galileo, Cavendish lo hizo poco después de que muriera aquél. El único aspecto en que se parecía Cavendish a Galileo era en que los padres de ambos fueron científicos que adiestraron a sus hijos desde su más temprana edad. En todo

lo demás fueron completamente diferentes. Nada, ni circunstancial ni personal, se puede sacar en común entre Cavendish y su compatriota Newton si exceptuamos que ambos se formaron en Cambridge. Cavendish, como Galileo y casi como Newton, no obtuvo título universitario al final de sus estudios, pero en su caso fue por no declararse anglicano.

La educación del joven Henry fue la convencional entre los hijos de la aristocracia de la época: primero a base de tutores privados, a los once años en el seminario de Hackney, en las afueras de Londres, y a los dieciocho, en Cambridge, en este caso en el College Saint Peter. Y después, naturalmente, a disfrutar del Grand Tour por el continente.

Al regreso del «paseo» de iniciación por Europa llamado Grand Tour, Cavendish se enclaustró con su padre en la mansión familiar de Great Marlborough Street, en pleno Soho londinense. Lord Charles Cavendish era un hombre curioso en todos los sentidos de la palabra. Su deseo de aprender era grande, y sus costumbres y carácter, originales. El entonces afamado político y científico (y que después lo sería mucho más) Benjamin Franklin apreciaba mucho al padre de Henry, en particular por sus experimentos sobre la electricidad. También llevaba a cabo, siempre ayudado por su hijo, experimentos de química. La vida de ambos, en particular la del hijo, no podía ser más comedia: de mutuo acuerdo se le había asignado una renta de ciento veinte libras al año, más, por supuesto, cinco chelines para que se pagara las cenas en el club de la Royal Society, en la que ingresó con todos los honores en 1760, a los veintinueve años.

La vida de Henry Cavendish no sólo era modesta, sino también absolutamente reservada. Disfrutaba enormemente de la soledad, amaba la ciencia por sí misma y por nada más. Estos dos aspectos tan notables se reflejaban en ciertas costumbres que adquirió: apenas se relacionaba con nadie, ni siquiera con sus criados, y tampoco veía a menudo a otros miembros de la Royal Society. No salía de su mansión más que para las mencionadas cenas semanales. Además, los honores e incluso las aplicaciones que pudieran conllevar sus descubrimientos científicos le eran no sólo del todo indiferentes, sino que incluso evitaba que le ocasionaran la más mínima molestia. Por eso apenas publi-

caba, y cuando lo hacía sus escritos eran bastante incomprensibles, porque mucho de lo que se decía en ellos se basaba en resultados que nunca había publicado. Tuvieron que pasar muchos años para que se supiera —y en consecuencia se reconociera sin ninguna suspicacia— que muchos de los descubrimientos en química y electricidad que hicieron otros, como Priestley, Faraday, Ohm y Coulomb, los había hecho Cavendish antes. Esto lo descubrió, entre otros, el gran Maxwell, que más de un siglo después editó un libro con todos los hallazgos del oscuro noble inglés.

¿Cómo era la vida de este hombre tan extraño con su padre en la mansión de Londres? Nadie lo sabe, pero es fácil deducir que en nada se parecía a la de Newton en su laboratorio de alquimia. No sólo porque Cavendish era poco dado al ocultismo y el esoterismo de los alquimistas que tanto fascinaba a Newton, sino porque lo que él hacía era fundamentalmente medir. Los sutiles y grandiosos logros de Newton en física y matemáticas se desvanecían en cuanto se rodeaba de retortas, matraces y alambiques, experimentando con destilaciones y aleaciones sin apenas orden ni concierto; en cambio, en su laboratorio Cavendish buscaba la sistematización de datos cuantitativos. Por ejemplo, el primer artículo que publicó se titulaba «Factitious Airs», que quiere decir algo así como gases en forma de compuestos químicos. Esto, que muchos gases son compuestos de diferentes elementos químicos e incluso de una buena variedad de otros gases, puede parecer hoy día algo trivial, pero en aquel momento no lo era, porque la teoría imperante era la del flogisto: el único gas era el aire, y lo que emitían los materiales al arder o hervir era el flogisto que el aire contenía. Aunque Cavendish tardó mucho en rechazar tal teoría, buscando las propiedades del misterioso flogisto encontró cosas magníficas. Por ejemplo, la propia composición del aire. Después de cientos de análisis, concluyó que el aire estaba formado por nitrógeno en una proporción de cuatro a uno. Aún refinó más sus mediciones, y encontró que el porcentaje de ese gas, al que llamó «aire flogistizado» (hoy nitrógeno y argón), era un 79,167 por ciento y la parte «deflogistizada» era sólo un 20,833 por ciento (el valor actual es un 20,95 por ciento de oxígeno).

En esos años, que fueron muchos porque su padre murió en 1783, cuando Henry tenía cincuenta y dos, hizo otros descubrimientos pasmosos: el agua estaba formada por hidrógeno y oxígeno; definió las propiedades del hidrógeno, el elemento más simple y abundante del universo, que él llamó «aire inflamable»; midió los calores específicos de infinidad de disoluciones en agua; encontró cómo variaban los puntos de ebullición y congelación con la composición y concentración de esas disoluciones, etc. Por otra parte, llevaba a cabo fascinantes experimentos y mediciones de los fenómenos eléctricos. La ley del cuadrado inverso a la distancia de la fuerza entre cargas eléctricas, del todo análoga a la de Newton entre masas y que después se atribuyó al francés Coulomb, conociéndose hoy día como ley de Coulomb, en realidad la había descubierto Cavendish muchos años antes. Por cierto, Cavendish tenía tal aprecio por la medición que cuando no la podía hacer exacta (lo más exactamente posible, porque una medición experimental nunca es exacta) trataba de aproximarla a toda costa. Como no disponía de amperímetro, un aparato que le pudiera dar la «cantidad de electricidad» que circulaba por los alambres (después se llamó «intensidad»), se utilizaba a sí mismo, de manera subjetiva pero realizando tablas bien elaboradas. Quiero decir que recibía descargas, o sea, calambrazos, y anotaba con cuánta intensidad los había sentido. El pobre había descubierto la vil picanca. También descubrió uno de los tres elementos básicos de la electrónica primitiva: el condensador (véase la figura 5.1).

Los Cavendish, padre e hijo, no es que fueran avaros o codiciosos y por eso llevaban una vida austera y frugal, ni mucho menos; simplemente, no les interesaba el dinero: aunque el capital de la familia iba engrosándose descomunalmente por acumulación de herencias, en lo único que gastaban con largueza era en libros y en aparatos científicos. Además, no eran acaparadores, puesto que pusieron la impresionante biblioteca que fueron organizando a disposición de cualquiera que mostrara verdadero interés científico en ella. Pero pronto se dieron cuenta de que aquello implicaba tener que relacionarse con otros sabios, y eso no les gustó. Así que trasladaron la biblioteca a una propiedad suya, situada a unos seis kilómetros de Londres, llamada Clapham

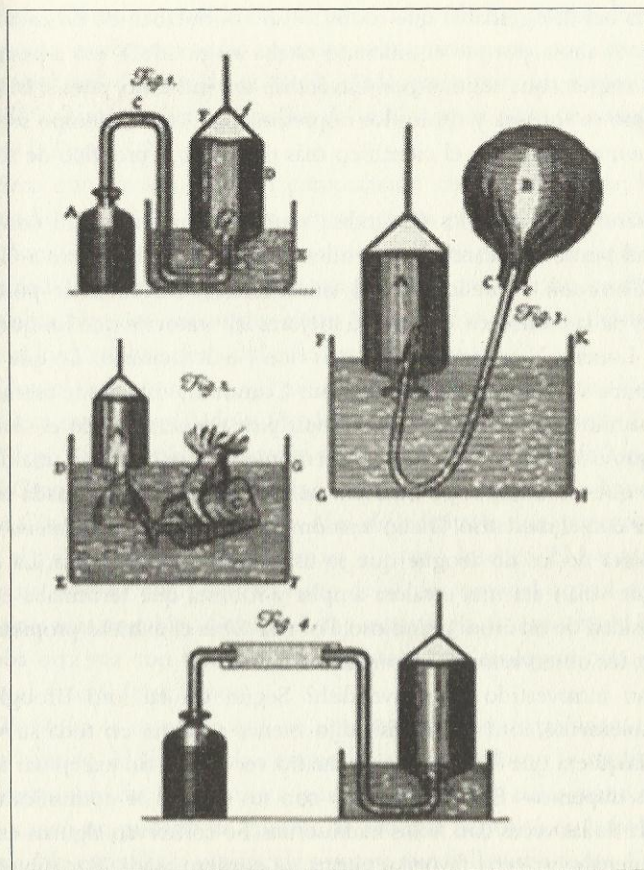


Figura 5.1. Esquemas de algunos de los dispositivos experimentales ideados y utilizados por Cavendish.

Common. Allí tenía que ir quien quisiera estudiar sin necesidad de encontrarse con ellos.

Las cenas del club de la Royal Society sí que no se las perdía Henry Cavendish, pero era tan extraordinariamente tímido y su voz

atiplada tan desagradable que todos los socios trataban de no caer a su lado en la mesa, porque el mutismo estaba asegurado. Y eso a pesar de que el respeto que sentían por Cavendish era inmenso, pues si bien al principio su fortuna y títulos los impresionaban, con el tiempo se dieron cuenta de que era el científico más profundo y prolífico de todos ellos.

Cuando lord Charles Cavendish murió, su hijo se sintió confuso hasta tal punto que cambió de residencia y fue a enclaustrarse a Clapham Common. Aquello implicó interesantes consecuencias porque, además de la biblioteca, construyó mejores laboratorios que los que tenía en Londres. Y se hizo a la vez más rico y más taciturno. Lo que más asombraba a los lugareños de Clapham Common, vista desde fuera, era un pináculo que les servía de referencia para no perderse en el condado y que no era otra cosa que un termómetro que contenía una disolución que nunca se supo cuál era pero que, desde luego, nada tenía que ver con el mercurio. Dicho termómetro era mucho más preciso que cualquiera de los de azogue que se usaban en aquella época. La otra cosa que veían era una escalera amplia y robusta que terminaba en la frondosidad de un árbol grandioso. Por ella subía el extraño propietario a hacer sus observaciones astronómicas.

¿Tan introvertido era Cavendish? Según un tal lord Broughan, «probablemente, lord Cavendish dijo menos palabras en toda su vida que cualquiera que hubiera vivido cuatro veces más, sin exceptuar a los monjes trapenses». El hecho es que con sus criados se comunicaba la mayoría de las veces con notas manuscritas. Se conservan algunas en las que ordenaba su cena favorita: pierna de cordero asada. Por supuesto, también era estafalario. Vestía siempre exactamente igual: una casaca de terciopelo descolorido, un chaleco y unas calzas ajadas de un extraño color violeta, una camisa de cuello alto de blancura incierta y puños con volantitos y un sombrero de tres picos.

Tal vestimenta llevaba casi un siglo pasada de moda, por eso a sus coetáneos les parecía tan extravagante como nos parece hoy día. Esta imagen de Cavendish la encontrará el lector en todas las enciclopedias que consulte, así como en la infinidad de páginas web dedicadas a Ca-

vendish. ¿Cómo he podido ser tan poco original? Ese dibujo, dos siluetas y una caricatura, todas tomadas subrepticamente, son las únicas imágenes que quedan de él. Jamás quiso posar para un retrato, rompiendo así una tradición familiar de ochocientos años de antigüedad (véase la figura 5.2).

Pero esto no era nada en comparación con su misoginia: Henry Cavendish no podía ver a las mujeres ni en pintura; literalmente. En Clapham Common desaparecieron todos los retratos femeninos, y a la infinidad de sirvientas que pululaban por allí no es que no les dirigiera la palabra, sino que tenían por cierto y por escrito que si se dejaban ver ante el lord, estaban despedidas de manera automática.

Con el dinero era casi tan extraño como con las mujeres. Hay una anécdota que recoge Aldous Huxley en su novela *Contrapunto*. Cavendish llegó a ser el más importante propietario de acciones de bancos de toda Gran Bretaña. Según Huxley, uno de los más reputados banqueros de la City tuvo la desafortunada idea de solicitarle una entrevista, a lo que el prohombre accedió al tercer o cuarto intento. El banquero le propuso invertir una pequeña parte de su descomunal capital en otras acciones más rentables. Cavendish fue escueto en su respuesta: si le molestaba otra vez con semejante propuesta o con cualquier otra, sacaría todo el dinero de su banco.

También se rumoreó que en una ocasión, cosa extrañísima, asistió a un bautizo. Al final de la ceremonia, su mayordomo le musitó que era costumbre dar una dádiva a la madre. Cavendish echó mano al bolsillo y sacó un puñado de guineas de oro que depositó en la bolsa petitoria. No entendía la mayúscula sorpresa que se llevaron todos. Cuando le explicaron el desafuero que suponía donar aquella fortuna, decidió lo siguiente: no asistiría a ninguna ceremonia más, ya fueran bodas, entierros o bautizos, pero el mayordomo debía enterarse de cuál había sido la dádiva más alta en cada ocasión y él la igualaría exactamente.

¿Recuerda el lector que alabé la forma elegante en que el aristócrata Eratóstenes se suicidó dejándose morir de inanición cuando consideró que se aproximaba su hora? Pues Henry Cavendish lo superó.



Figura 5.2. Uno de los pocos dibujos existentes que representan a Henry Cavendish.

Cuando tenía setenta y nueve años y sin que nadie tuviera noticia de que padeciera enfermedad alguna, el 24 de febrero de 1810 al atardecer llamó a su mayordomo y le dijo: «Atiende bien a lo que te voy a decir, voy a morir. Cuando esté muerto, no antes, le das la noticia a lord George Cavendish. Vete». Media hora más tarde volvió a llamar al consternado mayordomo y le hizo repetir sus instrucciones. Cuando estuvo satisfecho,

Cavendish replicó: «Muy bien. Ahora tráeme el agua de lavanda y después te vas». El mayordomo tardó unos días en percibir el inconfundible olor tras la puerta que le confirmó que había llegado el momento de avisar al sobrino de su señor, cumpliendo así cabalmente su orden póstuma.

El motivo de escribir este libro no es únicamente ilustrar al lector sobre los experimentos considerados más bellos de la historia de la humanidad, sino también acercarlo a sus autores por el lado humano y conseguir que capte las sutilezas y dificultades que tuvieron que vencer para llevarlos a cabo.

A continuación reproduzco un pasaje de un libro de física general considerado un *best seller* entre los estudiantes de infinidad de centros y

MEDIDA DE LA CONSTANTE GRAVITACIONAL

La constante gravitacional universal G fue medida en un importante experimento realizado por Henry Cavendish (1731-1810) en 1798. El aparato de Cavendish se compone de dos esferas pequeñas, cada una de masa m , fijas a los extremos de una ligera barra horizontal suspendida por una fina fibra o un alambre metálico delgado, como se ve en la figura 14.3. Cuando dos grandes esferas, cada una de masa M , se colocan cerca de las esferas más pequeñas, la fuerza de atracción entre las esferas más pequeñas y las más grandes hace que la barra gire y tuerza el alambre de suspensión a una nueva orientación de equilibrio. El ángulo al cual gira la barra se mide por la desviación de un haz luminoso que se refleja en un espejo unido a la suspensión vertical. La desviación de la luz es una técnica efectiva para amplificar el movimiento. El experimento se repite con cuidado con diferentes masas y distintas separaciones. Además de proporcionar el valor de G los resultados muestran experimentalmente que la fuerza es atractiva, proporcional al producto mM e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r .

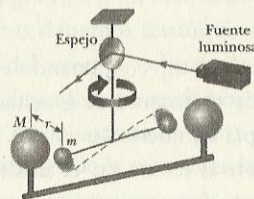


Figura 14.3 Diagrama esquemático del aparato de Cavendish para medir G . Conforme las esferas pequeñas de masa m son atraídas hacia las esferas grandes de masa M , la barra entre las dos esferas pequeñas gira un ángulo pequeño. Un rayo reflejado desde un espejo sobre el aparato en rotación mide el ángulo de giro. La línea punteada representa la posición original de la barra.

Figura 5.3. Reproducción de la explicación del experimento de Cavendish del libro de Serway y Beichner referenciado en el texto.

países (R. A. Serway y R. J. Beichner, *Física para ciencias e ingeniería*, McGraw-Hill, 5.ª edición, 2000, tomo I, p. 426).

Todo es correcto y la figura está muy bien dibujada. Aún más, concedo que un estudiante se puede hacer una idea bastante buena del experimento de Cavendish con esta explicación, pero ¿sería capaz de reproducirlo? La belleza del experimento radica precisamente en lo que no se dice en el libro. Cómo transmitir dicha delicadeza al lector es el objetivo de este libro, y voy a intentarlo. Si decide reproducir el experimento de Cavendish y no le sale, el lector ha de pensar en lo siguiente para consolarse: desde hace años, unos historiadores de la ciencia alemanes tratan llevar a cabo numerosos experimentos famosos usando manuscritos originales y materiales de la época. A pesar de que disfrutan con su trabajo y son muy cuidadosos, apenas han tenido éxito. Se puede consultar un artículo muy bonito de ellos en la revista *Investigación y Ciencia* (en el número correspondiente a julio de 2000) que se titula justo así: «La reproducción de experimentos históricos». Lo que propongo a continuación es una reproducción cualitativa de la medida de la constante de gravitación universal con medios baratos y materiales de hoy día. Si lo lleva a cabo, el lector se dará cuenta de la extraordinaria habilidad y paciencia de Henry Cavendish y de todos los experimentadores históricos.

Quedamos en que Newton estableció su ley de gravitación universal formulándola de este modo:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

donde F es la fuerza con que se atraen las masas m_1 y m_2 cuando están separadas por una distancia r . G es la llamada «constante de gravitación universal», es decir, es una característica propia de nuestro universo. Esta sencilla y fantástica fórmula se la enseñaron al lector en el instituto, pero quizá de manera un tanto esquemática. Vamos a profundizar un poco en ella. Empecemos con las masas. La masa, por más familiarizado que estemos con los gramos, los kilos y otras unidades con las que se la mide, en realidad es una propiedad de cada cuerpo que indica la canti-

dad de materia que posee. ¿Qué quiere decir esto? Pues que la masa es distinta al peso, que es con lo que estamos familiarizados. El peso es la fuerza con que la Tierra atrae a los cuerpos que están cercanos a ella en virtud de la fórmula anterior. Cercanos y lejanos, porque esa fuerza tiene un alcance infinito, lo que ocurre es que disminuye con la distancia al cuadrado y eso la empequeñece a un ritmo muy rápido. Pero cero es distinto que pequeño. La relación entre la masa y el peso se puede establecer muy fácilmente. Supongamos que se trata de nuestro cuerpo. Nos pesamos en la farmacia de la esquina y, digamos, la máquina nos da el resultado de 75 kilogramos. ¿Esto es la masa o el peso? El peso. Insistimos en que el peso es la fuerza con la que la Tierra nos atrae hacia su centro. Para expresar esta fuerza apropiadamente tendremos que poner en la fórmula de Newton que la otra masa es la de la Tierra y la distancia el radio de la Tierra, si es que estamos en su superficie. Ya lo hicimos en el capítulo de Newton, y obteníamos:

$$\text{Peso} = F = G \frac{M_T m}{R_T^2} = mg$$

donde g , de nuevo, es la aceleración que imprime esa fuerza a los cuerpos y que evoca a Galileo. Este producto de nuestra masa por la constante g son los 75 kilogramos. Esto es confuso porque antiguamente a esa unidad se la llamaba «kilopondio», que es g veces mayor que el «newton», la unidad apropiada. Hoy día se le llama «kilogramos peso» para terminar de confundir, porque siempre se simplifica llamándole «kilogramo» o incluso «kilo». A pesar de la confusión cotidiana de masa y peso, debemos distinguir sencillamente que la masa es una característica del cuerpo y el peso la fuerza con que la Tierra lo atrae. Los pocos privilegiados que se ponen en órbita tienen exactamente la misma masa que en la superficie, pero su peso se ve contrarrestado por la fuerza centrífuga de la nave espacial al girar en torno a la Tierra. Aún más, en la Luna nuestro peso sería muy distinto (mucho menor) que aquí, y en cambio la masa sería exactamente la misma.

Ahora pensemos en las distancias. ¿Qué es la r ? La distancia entre los centros de las masas que se atraen. Imaginemos una pequeña nave

espacial alejada de cualquier planeta o estrella y de la que sale un astronauta para reparar algo en el exterior. La nave y el astronauta se atraen mutuamente. Si quisiéramos averiguar con qué fuerza lo hacen, la distancia que tendríamos que poner en la fórmula de Newton sería la que separa sus centros de gravedad. Se podría considerar que en estos centros está concentrada toda la masa de ambos cuerpos: este concepto fue introducido por los griegos, y quien más trabajó en él fue nuestro querido Arquímedes. El centro de gravedad de la nave estará en su interior, y seguramente muy bien situado por los ingenieros que la diseñaron. El del astronauta debe andar dentro de la barriga, a la altura del ombligo. Si en la Tierra lo suspendieran por él (por eso se llama centro de gravedad), todas sus partes quedarían en equilibrio. Incómodo, pero en equilibrio. Ya que estamos en la Tierra otra vez diremos que, como está ligeramente achatada por los polos a causa de la fuerza centrífuga generada por su rotación, en los polos pesamos unos gramos más que en el ecuador. Si al lector le gusta calcular, tome nota de los siguientes datos y puede aplicar la fórmula para averiguar lo que decimos con bastante precisión:

$$\text{Masa de la Tierra} = M_T = 5,97369 \times 10^{24} \text{ kg}$$

$$\text{Radio de la Tierra (en el ecuador)} = R_T = 6,37814 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\text{Constante de gravitación universal} = G = 6,67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$$

Recordemos que diez elevado a un número es un uno seguido de todos esos ceros, y diez elevado a un número negativo es cero, coma y ese número de ceros menos uno, y un uno, o sea, $10^7 = 10.000.000$, diez millones; $10^{-4} = 0,0001$, una diezmilésima.

Vamos ahora con la fuerza F . Para empezar, es una fuerza ejercida a distancia, es decir, sin ningún contacto entre los cuerpos que la sienten. A esto podemos estar acostumbrados, pero para Newton, y aun hoy día, esto exige un nivel de abstracción enorme, pero no voy a aturdir al lector con el concepto de campo ni de bosones intermediarios. Quédemonos en averiguar si la fuerza de la gravedad es muy intensa o no. Creo que una caída al suelo desde una altura de nueve u diez metros

casi garantiza la muerte del desdichado. Ésta es una distancia tan pequeña en comparación con el radio de la Tierra, de seis mil y pico kilómetros, que nos hace pensar que la fuerza de la gravedad es bastante poderosa, aunque en realidad es casi inimaginablemente débil. Lo que ocurre es que al cuerpo que cae lo atrae la masa de todo el planeta: seis cuatrillones de kilos. Una manera de visualizar la debilidad de la fuerza de la gravedad es la siguiente: supongamos que un astronauta deja dos bolas de petanca de un kilo de masa cada una flotando en el espacio interestelar. Quedan separadas un metro. Como el lector ya estará familiarizado con la fórmula de Newton, calcule y verá que las bolas se atraen con una fuerza de $6,67259 \times 10^{-11} \text{ kg m/s}^2$, o sea, $6,67259 \times 10^{-11}$ newtons. Volvamos a la Tierra y calculemos ahora el peso equivalente a esa fuerza: $6,67259 \times 10^{-11} \text{ kg} = 0,00000007$ gramos. Estamos hablando de lo que pesa una bacteria, o incluso menos.

Ya estamos en disposición de afrontar la tarea de Henry Cavendish al tratar de medir el valor de la constante de gravitación universal. En su época, nadie ponía en duda la corrección de la fórmula de Newton, pero nadie había medido cuánto podía valer la famosa G . Además, el radio de la Tierra se conocía desde Eratóstenes, pero la masa del planeta se desconocía.

A la edad de setenta años y ante la imposibilidad de ponerse en órbita, Henry Cavendish ideó una especie de balanza (como la que indica el esquema del libro de Serway y Beichner), y la instaló en el sótano de su casa de Clapham Common (véase la figura 5.4).

O sea, que trataba de medir la atracción entre dos bolas pesadas basándose en la siguiente sutileza. En plan abstracto, hoy día se dice que las fuerzas de la naturaleza son invariantes «gauge». Esta palabra, «gauge», significa «patrón», «calibre» o algo así, pero se ha incorporado tal cual al lenguaje internacional de la física. Indica que los valores absolutos de ciertas magnitudes, como la fuerza, no cuentan, sino que sólo importan las diferencias entre ellas. Al desdichado que se mata por caer desde una altura de tres pisos le hubiera pasado lo mismo si hubiese caído desde el tercero a la calle que desde el séptimo al cuarto. Los pájaros se posan tan tranquilos en los cables de alta tensión (cientos de

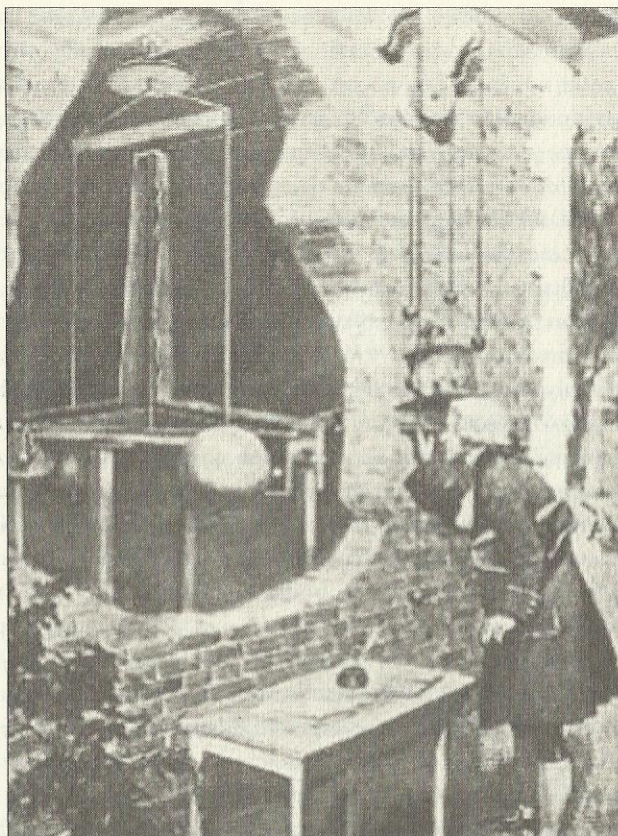


Figura 5.4. Grabado que representa el laboratorio de Cavendish para la determinación de la constante de gravitación.

miles de voltios), pero los más grandes, como las cigüeñas, a veces chocan con sus alas contra los postes que van a tierra y el cable a la vez: se achicharran sin remisión. Lo que ha contado para ellas no son los cientos de miles de voltios, sino la diferencia entre éstos y el suelo, que está a cero voltios. (Cien mil voltios en una pata menos cien mil en la otra:

nada, el pajarito se queda tan tranquilo; cien mil voltios en una pata menos cero en el ala: cien mil, adiós a la pobre cigüeña.) Cavendish tenía que tratar con diferencias de fuerzas del orden del peso de una bacteria. Consiguió medir G con una precisión del 2 por ciento. Vamos a tratar de emular lo que hizo con mucha más ventaja y con una ambición tan reducida que nos conformaremos con ver cómo actúa la fuerza de la gravedad con una balanza de torsión como la suya: nada de medir G . Veremos la magnitud de la proeza del extravagante inglés.

El principio de la balanza de torsión de Cavendish es muy simple. Tal como vimos en la figura de Serway y Beichner, se trata de colgar de un hilo un brazo en cuyos extremos se colocan dos cuerpos de masas mucho mayores que el brazo. Enfrentadas a éstas se ponen otras dos que las atraerán gravitatoriamente, haciendo girar la balanza. Empecemos por el material de las masas que se van a atraer. Hay un principio en la física del que Einstein hizo un uso maravilloso: el principio de equivalencia. En una de sus acepciones se puede enunciar diciendo que la fuerza de la gravedad actúa entre los cuerpos de manera independiente a su composición. Así pues, los cuatro cuerpos pueden estar hechos de cualquier material, pero cuanto más denso sea, mejor. ¿Por qué? Como la fuerza depende del cuadrado de la distancia entre los centros de los cuerpos, si son de madera tendrán que ser mucho más grandes que si son de plomo, por lo que hay que ponerlos más lejos. El plomo es el material ideal (el oro es más denso, pero algo más caro, y el plutonio, el mejor, conlleva el riesgo de que al tratar de hacernos con él nos tomen por terroristas nucleares). Hay que evitar también usar, por lo menos en las cuatro masas, hierro o acero, porque interactuarán con el campo magnético terrestre y podemos terminar inventando la brújula.

Antes de seguir con nuestro experimento casero, muestro con algún detalle una balanza de Cavendish comercial, de las que se utilizan en los laboratorios de las facultades de física. Es muy buena, aunque bastante cara. La nuestra, si midiéramos con ella, será igual de precisa, pero baratísima (véase la figura 5.5).

Observe el lector lo cuidadoso que hay que ser, porque en realidad nos enfrentamos a una fuerza extremadamente débil. Podemos encon-

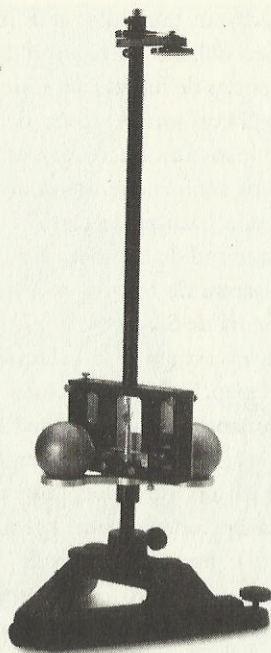


Figura 5.5. Dispositivo comercial para la determinación de la constante de gravitación universal.

trar plomo fácilmente y barato en una tienda de deportes, sección de pesca. Las plomadas de mayor peso son las que nos interesan. Podemos comprar dos o cuatro. Ya que estamos allí, compraremos también hilo de línea de pescar. Le diremos al vendedor que queremos que aguante entre tres y cinco kilos. Nos harán falta unos tres metros, pero mucho me temo que al lector le pasará lo que a mí, que tendrá que comprar un carrete de trescientos. No nos arruinaremos. El brazo, que ha de ser de material ligero, puede hacerse de espuma de polietileno, ese plástico blanco con el que envuelven los objetos frágiles. Unas dimensiones de cinco o seis centímetros de ancho, lo mismo de alto y unos treinta de lar-

go será suficiente. En los extremos pondremos las plomadas. Pero antes hay que hacer lo siguiente (ya verá el lector que es muy aconsejable): instalar un freno. En la parte de abajo del brazo, es decir, en el lado opuesto de donde colocaremos las masas, clavaremos con cuidado, y paralelo al brazo, una chapa de unos veinte centímetros de largo y diez de ancho. No hay que ser exactos en esto, ni mucho menos. Mejor será que utilicemos también un poco de pegamento para evitar que se nos caiga el freno, que ya veremos cómo se utiliza y para qué sirve. Ahora pasamos alambre, a ser posible de cobre mejor que los normales (por lo de la brújula), por debajo de las masas. Las muescas que hará en el brazo evitarán que se deslice. De ese alambre amarraremos el hilo de nailon equilibrando el brazo con ayuda de un nivel de albañil. Ya tenemos una balanza de torsión. Ahora hay que ver dónde la colocamos.

El mejor sitio es en el centro de un sótano, pero veamos por qué. Sobre las masas del brazo (los pesos de plomo) no sólo actuará la fuerza de la gravedad creada por las otras masas a las que las enfrentaremos (dos bolas de petanca u otras dos plomadas), sino también las paredes de la habitación y lo que haya detrás de ellas. Un sótano nos garantiza que lo que hay es hormigón y tierra en la misma proporción por todas partes. Si hacemos el experimento en, por ejemplo, una habitación exterior, la pared que da a la calle atrae menos a las masas que las otras. ¿Tan delicado es el asunto? Lo es muchísimo más. Los otros enemigos del experimento son las corrientes de aire, las diferencias de temperatura, la resistencia del hilo a la torsión, las vibraciones del tráfico e incluso los ruidos. Así pues, lo mejor será hacer el experimento sin nuestra presencia.

La balanza se puede colgar o bien de una escalera de aluminio en forma de tijera o de un cáncamo fijado al techo. En cualquier caso, lo haremos en el centro de la habitación. Si en el sótano o en el garaje (fue mi caso) hay un coche, habrá que sacarlo. Ahora sólo falta el asunto del freno.

Cuando tengamos colgada la balanza del techo o de la escalera nos enfrentaremos a un problema casi insoluble: mantener quieta la balanza. No habrá manera, por más cuidado que pongamos. Está tan bien

hecha que el temblor de nuestros dedos, el calor desprendido por nuestro cuerpo, el aire que respiramos, todo, la harán moverse incontroladamente. Cogemos un cubo y lo llenaremos de agua. Mejor sería un recipiente lleno de aceite, más plano, en que la chapa que pegamos al brazo por debajo se sumerja sin rozar en ninguna de sus paredes ni en el fondo, pero una lata de conserva ancha y grande puede valer. Para el que quiera saber cómo actúa el freno o amortiguador, le diré que la energía cinética del movimiento de la balanza se convierte así en calor de manera muy eficiente. El aceite es algo más engorroso que el agua y la diferencia no es grande. Se puede usar agua.

Colocaremos las bolas de petanca sobre tacos del plástico de envolver, que es muy ligero y nos permite enfrentarlas a los pesos de la balanza además de servirnos de tope. Luego colocaremos la balanza de manera que las plomadas estén lo más alejadas que nos permitan los toques de las bolas de petanca y nos iremos sigilosamente de allí. Más o menos media hora más tarde regresaremos y encontraremos que la balanza ha girado hasta que los pesos y las bolas se han aproximado al máximo. Las colocaremos al contrario y nos iremos otra vez. A la media hora veremos que la balanza ha girado en el sentido opuesto: hemos detectado la sutil fuerza de la gravedad. Si estamos en un garaje con ventana, podremos ver el giro desde fuera. Si hacemos el experimento en un sótano nos tendremos que servir de una cámara de vídeo y situarla lo más alejada posible del aparato. Un consejo para antes de empezar es dejar la balanza un rato girando sin el freno para que los hilos, alambres, plásticos y demás se deformen y alcancen cierto equilibrio al relajarse los materiales.

Ya puestos, yo quise emular a Cavendish hasta sus últimas consecuencias. Coloqué un espejito en el hilo sobre el cual hice incidir un rayo láser de un puntero (me costó diez euros) y medí la velocidad de giro sin amortiguador (una hazaña) infinidad de veces (entre diez y veinte) con seis juegos de masas diferentes. Hice las cuentas bien hechas y el valor que obtuve de la constante de gravitación universal no fue tan exacto como el obtenido por Henry Cavendish hace más de doscientos años. Lloré y gloria al gran misógino.

6

Young

El carácter ondulatorio de la luz

«¡Hágase la luz! Y la luz se hizo.» Así me enseñaron a mí en la escuela la creación según el Génesis de las Sagradas Escrituras. Cuando tuve noticias, allá por los años sesenta del siglo pasado, de la moderna teoría de la Gran Explosión no entendía por qué la Iglesia se oponía a ella si, *grosso modo* (muy *grosso*), parecía acorde con sus enseñanzas. Al fin y al cabo, la Gran Explosión fue un portentoso estallido de energía en forma de radiación y la luz es la pequeña porción de esa radiación que es capaz de detectar el ojo humano. Después, cuando los éxitos y refinamientos de la teoría se fueron confirmando, la Iglesia pareció aceptarla a regañadientes. Bien podía ser que el causante del estallido fuera Dios. Pero cuando se descubrieron las fluctuaciones cuánticas que demostraban que semejante eclosión de energía puede tener lugar espontáneamente, haciendo del todo innecesaria la intervención divina, los teólogos de nuevo fruncieron el ceño, y en esas parece que siguen. No sé. El caso es que yo creo que el pasaje del Génesis constituye, al menos, una formidable intuición humana. Una de sus traducciones más aceptadas dice así:

En el principio creó Dios los cielos y la Tierra. Y la Tierra estaba desordenada y vacía, y las tinieblas estaban sobre la faz del abismo, y el espíritu de Dios se movía sobre la faz de las aguas. Y dijo Dios: Sea la luz; y fue la luz. Y vio Dios que la luz era buena; y apartó Dios a la luz de las tinieblas. Y llamó Dios a la luz Día, y a las tinieblas llamó Noche; y fue la tarde y la mañana un día.

Haciendo abstracción de los sinsentidos que contiene el pasaje, entre otras cosas porque otras traducciones dan propiedades distintas a la Tierra antes de que se hiciera la luz (*invisibilis et incomposita* o *aoratos kai akataskenastos*, que es lo mismo y significa, en latín y griego, «invisible y sin forma»; *inanes et vacua*, «vana y vacía»; *tobu wa bobu*, en hebreo, «inespecífica y caótica», etc.) vemos que la mente humana siempre ha sabido o intuitido que el mundo, el universo, estuvo y está compuesto de materia y radiación. No es de extrañar, por tanto, que las grandes mentes de todas las civilizaciones se hayan esforzado en averiguar qué son la una y la otra.

Hoy día sabemos que la materia está formada por moléculas, que son agregados de átomos, y que éstos, a su vez, no son como intuyeron magníficamente Leucipo y Demócrito, indivisibles, sino que son unos tinglados maravillosos formados por tenues nubes de electrones que envuelven un corazón poderoso, el núcleo atómico, minúsculo recinto en donde se concentra casi toda la masa y la energía de la materia. Las partículas que forman dicho núcleo, los protones y los neutrones, son a su vez semillas duras que en su interior guardan celosamente tres quarks enloquecidos y envueltos por marañas de gluones. Hasta esta inextricable profundidad de conocimiento de la intimidad de la materia hemos llegado, y quizá hayamos alcanzado los últimos escalones de este edificio del mundo. ¿Y la luz?

Aunque muchos colegas físicos seguramente responderían que de la luz lo sabemos todo y mejor que de la materia, yo mantendría que la luz es harina de otro costal. Y eso a pesar de que Einstein haya establecido la estrecha relación existente entre materia y energía, por ejemplo en forma de radiación, en su célebre $E = mc^2$. En esta fórmula la m es la masa y E la energía, que se transforman una en la otra según el factor c^2 , la velocidad de la luz en el vacío al cuadrado (un número tan enorme que recordar una explosión nuclear nos puede dar una buena idea de lo que implica). A raíz de este descubrimiento se podría pensar que todo lo que se conozca de la materia se conocerá de la luz, pues al fin y al cabo lo han de tener casi todo en común. Hasta cierto punto es así, pero no del todo.

Advierto al lector de que soy consciente del batiburrillo que le puedo estar formando con lo de la luz y la radiación. Insisto en que llamamos luz al estrecho rango de la radiación que percibe el ojo humano, pero aunque para otros rangos (infrarrojo, ultravioleta, ondas de radio, rayos X, etc.) tengamos que utilizar otros detectores distintos del ojo para percibirla, toda la radiación tiene la misma naturaleza. Ahora bien, ¿cuál es esta naturaleza? Ése es el problema.

Hay un libro excelente sobre la historia de la luz, es decir, sobre cómo se ha entendido la luz a lo largo de la historia; remito a él al lector interesado en esta apasionante aventura del hombre. Se titula *The Fire Within the Eye* y su autor es David Park. Está publicado por Princeton University Press en el año 1997 y, lamentablemente, no creo que esté traducido al español. Cuando se lee un libro así, aparte de la fascinación que produce ver cómo las distintas civilizaciones han enfocado el asunto, se ve que portentosos pensadores fracasaron (y lo dijeron) al intentar resolver el problema de la naturaleza de la luz.

Desde los albores de la cultura hasta nuestros días el camino del conocimiento ha sido tortuoso y lleno de sorpresas, pero más o menos ha ido serpenteando en la dirección apropiada. Con la luz no ha sido del todo así. Los griegos clásicos fueron convergiendo hacia el concepto de rayo. Cuando la luz del sol penetra por un agujero de una habitación oscura es obvio que va en línea recta. Además, o es instantánea o su velocidad es portentosa. Pero incluso esto de los rayos era misterioso. Hubo quien elaboró una sofisticada teoría (no voy a decir quién para que el lector no me tache de demasiado irreverente) según la cual, relacionando la luz con la visión, se establecía que aquélla era creada por el ojo humano, que lanzaba rayos como el camaleón lanza su lengua para atrapar insectos. La pieza a capturar en el proceso era el objeto a observar. ¿Hasta dónde llegaban estos rayos? Hasta las estrellas si falta hacía, y además instantáneamente. ¿Qué pasa por la noche? Con los humanos no se sabía bien qué sucedía, pero los gatos veían en la oscuridad.

No se deben ridiculizar mucho estas ideas extravagantes porque esos mismos autores (y otros) alcanzaron un considerable grado de conocimiento de óptica geométrica, es decir, sobre el camino que seguían

los rayos luminosos en distintos medios. Incluso elaboraron ingeniosos modelos acerca del color. Por aquella época también se concibieron ideas magníficas que fueron tachadas de grotescas. Por ejemplo, los atomistas desde Leucipo y Demócrito siempre sostuvieron que la luz y los átomos estaban íntimamente conectados. Lo único que tenían en común ambas corrientes de pensamiento era la incompatibilidad entre ellas.

En el libro de Park se muestra cómo los árabes, los Santos Padres, los hindúes y demás fueron desarrollando las teorías de la luz, la visión y el color. Lo hicieron con grandes aciertos; me remito a lo ya comentado sobre el arco iris. Pero sobre la naturaleza de la luz todos se mostraban inseguros. Galileo dejó por escrito en «El experimentador» su aturdimiento cuando trató el problema, y el gran Newton, a pesar de haber dejado sólidamente asentadas las bases de la óptica, no se dejó convencer por ciertas evidencias, alcanzadas por él y su oponente Huygens, que sugerían que quizá la luz, aquel «agregado confuso de rayos», como él la definía, tuviera naturaleza ondulatoria. Mantuvo hasta el final de sus días que, como sugerían Leucipo y Demócrito, la luz era un flujo de partículas minúsculas.

Lo del carácter ondulatorio de la luz se fue fraguando muy poco a poco, y Huygens llegó a unificar bastante bien la idea de rayo con la de onda e incluso, siendo generosos, con la de flujo de partículas. Para mucho de lo que expodré después en este libro es importante que entendamos las ideas del maestro holandés.

En su libro *Tratado sobre la luz*, escrito en 1678 y publicado en 1690, Huygens establecía un principio que, aunque a la postre se demostraría falso, fue muy útil para avanzar en el conocimiento de la luz y de muchas otras cosas. La luz es materia en movimiento. No es un haz, a modo de rayo, de partículas, sino que, como el sonido, se transmite haciendo moverse el aire. Y este movimiento es igual de ondulatorio que el sonido o las ondas que se forman al caer una piedra en un estanque. Pero surgía un problema: por ejemplo, cuando suena una campana, el aire no se mueve desde ella hasta nuestro oído, sino que vibra, y esa vibración es la que percibimos. Si se extrae el aire entre la fuente de soni-

do y nuestro oído, aquélla deja de oírse, pero sigue viéndose. Se habían realizado innumerables experimentos sencillos que demostraban este hecho. Así pues, la luz no necesitaba el aire para transmitirse, sino algo mucho más sutil y aristotélico: el éter. Esta sustancia evitaba el horror al vacío de tal manera que no había bomba capaz de absorberlo como hacía con el aire. La luz se propagaba ondulatoriamente a través del éter, al igual que el sonido lo hacía por el aire. Las partículas de aire eran inmensamente más grandes y pesadas que las del éter, que impregnaban todo el universo.

El caso es que la idea funcionaba bien, porque la luz seguía algunos patrones de propagación del todo análogos a las ondas. Por ejemplo, si la onda circular que provoca la caída de una piedra en un estanque se encuentra con un tablón donde se haya practicado una abertura, la onda se comportará como un nuevo foco de ondas circulares. Eso hace también la luz. Y el sonido (véase la figura 6.1).

Si el lector conoce bien lo que es una onda, puede saltarse el siguiente párrafo. Una onda está definida por cuatro magnitudes: la *amplitud*, que es hasta dónde se extiende la onda desde la línea que sigue su propagación; la *longitud de onda*, que es la distancia entre dos puntos

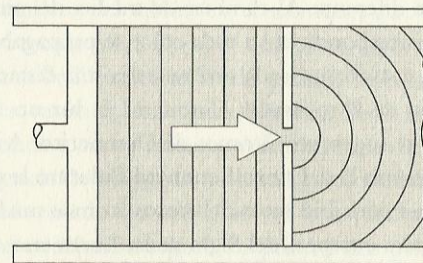


Figura 6.1. Ondas propagándose en la superficie de un líquido en el sentido indicado por la flecha. Las líneas verticales representan las crestas de cada onda. Al llegar a un obstáculo en el que hay practicado un orificio, se propagan de manera circular demostrando que cada punto del frente de ondas se comporta como un nuevo foco de ondas.

análogos subsecuentes (por ejemplo, entre dos cimas o dos valles); la *frecuencia*, que es el número de ondas que pasan por un determinado punto cada segundo, y la *velocidad*, es decir, aquella con la que se desplaza a lo largo de la línea indicada.

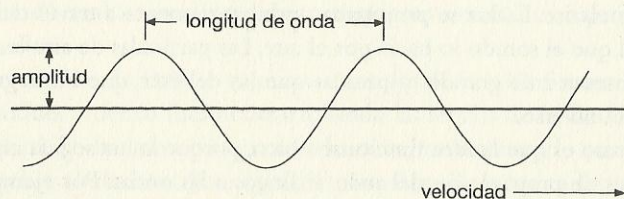


Figura 6.2. Magnitudes que definen una onda.

La primera es independiente de las otras tres, que están relacionadas entre sí de un modo muy sencillo.

A partir de esta naturaleza ondulatoria de la luz se pueden explicar muchas cosas. Por ejemplo, los maravillosos resultados de los experimentos con prismas de Newton. Su «agregado confuso de rayos» no era más que una combinación de colores que correspondían cada uno a una longitud de onda diferente. Al cambiar de medio, del aire al vidrio del prisma, la onda correspondiente a cada color se propagaba a distinta velocidad y, debido a su forma, cada una recorría una distancia distinta, de manera que salían de él separadas. Entonces, ¿la luz no tiene nada que ver con los siempre sugerentes átomos de Demócrito? A una mente tan aguda y sensible como la del suizo Leonhard Euler no le podía satisfacer tal divorcio, así que concibió unos deliciosos átomos musicales.

Las universidades europeas del Siglo de las Luces eran más bien mortecinas. Donde realmente se acogían los más eminentes sabios era en las academias y en las cortes reales o, mejor, imperiales. A los veinte años, Euler llegó a la Academia de San Petersburgo, recién fundada por la zarina Catalina, viuda nada menos que de Pedro el Grande. Trece años después, lo reclamó Federico el Grande de Prusia y marchó a Berlín, pero después de veintiséis años regresó a la tranquila y esplendorosa San Petersburgo.

Seguro que el lector recordará la película *Una mente maravillosa*. Pues la mente de Euler era mucho más maravillosa que la del desdichado John Forbes Nash, Jr. Su memoria y su capacidad matemática eran legendarias. Respecto a la primera baste indicar que se sabía *La Eneida* de memoria, y respecto a la segunda baste decir que en 1911 se inició la compilación de sus trabajos y posterior publicación, que hasta ahora han salido setenta y ocho volúmenes y que aún quedan dudas sobre si se han completado. Ningún matemático ha escrito tanto y pocos lo han hecho tan bien.

Además de tanta matemática pura, Euler escribió tratados sobre física, agricultura, construcción de barcos y diez o doce campos más. En su obra destacan cinco volúmenes sobre óptica. En uno de ellos desarrolla toda la teoría de la luz al propagarse como una onda en el éter en completa analogía con el sonido en el aire. Llegó incluso más lejos, porque, por ejemplo, atinaba bastante intuitivamente la causa del color. Euler pensaba que un objeto es rojo porque las partículas de su superficie vibran a la frecuencia del rojo. Si se ilumina con luz blanca, el objeto responde a las vibraciones del rojo y reemite la luz roja. Esta reflexión de la luz no es como un rebote de bolitas, sino que la luz reemitida en realidad está producida por átomos vibrantes. Esto, si se piensa bien, es una revolución, porque, por una parte, retoma la teoría de Huygens en el sentido de que cada átomo es como el agujero del tablón en el estanque, que crea una nueva onda cuando otra incide sobre él, y por otra parte, supone una recuperación del automismo de Demócrito. Y si la analogía de la luz con el sonido es tan rigurosa, es como si los átomos tuvieran cierto carácter musical. Una idea muy bonita y, como veremos, nada ingenua.

Euler, a diferencia de Huygens, no hizo un solo experimento, y Galileo había dejado sentado que sin observar la naturaleza directamente no había ninguna conclusión segura. La prueba más palmaria y definitiva de que la luz era de naturaleza ondulatoria la dio en 1803 un médico londinense llamado Thomas Young.

Como muchos miembros de la Royal Society, Young era un dilettante rico. Era extraordinariamente inteligente y muy hábil con las manos, pero no dejaba de ser un aficionado. Parece ser que además de latín y griego dominaba diez o doce lenguas más, la mayoría tan muertas

como aquéllas, pero, curiosamente, se expresaba muy mal en inglés. Esto tuvo dos consecuencias: Young debía de ser bastante buen médico porque estudió en centros muy prestigiosos de Europa, pero su extravagante forma de hablar inspiraba tan poca confianza que apenas tenía pacientes. Como era rico por familia, porque su padre era banquero y había heredado en numerosas ocasiones, tener pocos pacientes fue más bien una ventaja para él, porque de ese modo podía dedicar mucho tiempo a sus elucubraciones y experimentos. Por otro lado, aunque en la Royal Society lo respetaban mucho, aburría soberanamente a su audiencia. Así, entre lo mal que se expresaba y la poca matemática que sabía, nada había más farragoso de seguir y de entender que una charla de Young. Y los que lo aguantaban tuvieron que soportar treinta y ocho espantosas conferencias sobre la luz y el color hasta que en la treinta y nueve mostró el experimento decisivo, que vamos a comentar y que cualquier estudiante de física denomina «experimento de Young».

La primera parte de dicho experimento es muy sencilla, así que el lector podrá reproducirla con cuidado y paciencia. En una habitación a oscuras, Young iluminaba intensamente una tira de cartulina de menos de un milímetro de ancho contra una pantalla. No obtenía una sombra de la tira de cartón, sino una sucesión de franjas paralelas a ella. Esto era muy curioso, pero lo realmente pasmoso era que si, con cuidado, interponía una cartulina de mayor tamaño ocultando las franjas de arriba, las de abajo desaparecían. En la figura 6.3 queda claro el asunto.

Este fenómeno no era muy difícil de interpretar. Según Huygens, cada punto de un frente de ondas se puede comportar como un nuevo foco de ondas. Volvamos al estanque y el tablón con una abertura. Cuando las olas producidas por una piedra al caer llegan al tablón se detienen y rebotan, pero en la abertura se vuelven a producir olas propagándose circularmente por la superficie detrás del tablón. (El lector puede reproducirlo en la bañera de su casa.) Y esto sucede así esté la abertura donde esté. O sea, que todos los puntos del frente de ondas se comportan igual: son equivalentes. El borde superior de la cartulina se comporta como la abertura: genera una nueva onda. Y el borde inferior también. Las nuevas ondas generadas interfieren entre sí. ¿Qué es esto de la interferencia?

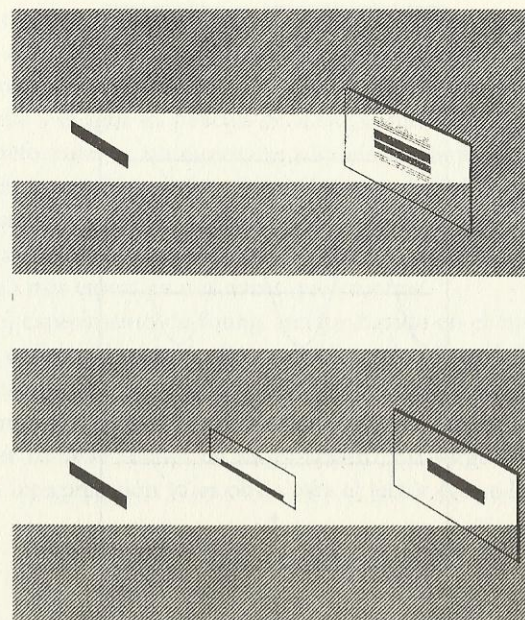


Figura 6.3. Esquema del primer experimento de Young.

Pues la simple suma de las dos ondas. Cuando una onda se suma a otra, en cada punto ocurre algo diferente. Habrá puntos en que coincidan dos valles o dos crestas. Entonces las vibraciones del agua, del aire o del «éter» se harán más amplias: las olas son mayores, el sonido más fuerte y la luz allí más intensa. Si en un mismo punto coinciden el valle de una con la cresta de otra, se anularán: agua en reposo, silencio u oscuridad. Pero la mayor parte serán situaciones intermedias (véase la figura 6.4).

Éste es el origen de las franjas de Young: las ondas provocadas por el borde superior de la cartulina interfieren con las del borde inferior y surgen franjas llamadas «de interferencia». Cuando se tapa uno de los bordes con la otra cartulina, las ondas generadas por el otro no tienen otra con la que interferir y adiós a las franjas.

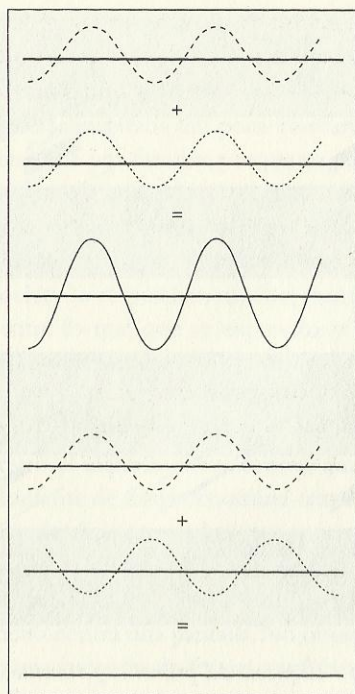


Figura 6.4. Suma de dos ondas iguales en situaciones extremas. En el primer caso, los valles y las crestas coinciden de manera que la interferencia entre ellas da una onda de amplitud doble. En el segundo, los valles de una coinciden con las crestas de las otras, por lo que interferirán destructivamente anulándose entre sí. Si fueran ondas de sonido, en el segundo caso se produciría silencio.

Todo esto se sabía más o menos desde los trabajos de un jesuita llamado padre Grimaldi, que vivió un siglo antes que Young. Incluso Newton sospechaba lo de la interferencia, y la prueba está en que explicó algo que seguramente el lector nunca ha considerado. ¿Por qué una mancha de aceite en el suelo mojado produce esas bonitas franjas de colores? Según Newton, es muy sencillo. La luz llega a la mancha. Una

parte de esta luz se transmite, y otra parte se refleja. La parte que se transmite atraviesa el aceite y llega al agua. Esta luz hace lo mismo: una parte se transmite hasta el suelo y otra se refleja. Las dos ondas reflejadas por el aceite y el agua (la película de aceite es muy fina) interfieren entre sí. Al reforzarse o contrarrestarse adquieren longitudes de onda un tanto diferentes, que corresponden a distintos colores. Ya tenemos explicadas las bonitas franjas coloreadas de formas curiosas. Estas formas se deben a que la capa de aceite no es perfectamente homogénea, sino que es algo más espesa en una zonas que en otras.

Pero el experimento de Young, aunque basado en el anterior, fue el siguiente: en lugar de una tira fina, colocó entre el foco de luz y la pantalla una cartulina con dos rendijas muy juntas. Esto es más difícil para el lector, porque las rendijas han de ser muy finas y la separación entre ellas debe tener bastante menos de un milímetro. Así surgen las franjas de nuevo. La interpretación ya es obvia para el lector (véase la figura 6.5).

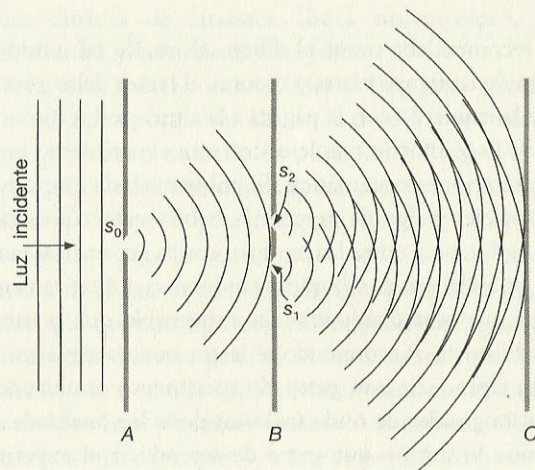


Figura 6.5. Interferencia de las dos ondas en que se descompone una que llega a una rendija doble. El resultado serán zonas reforzadas, nulas e intermedias. En el caso de luz, se verían franjas brillantes, oscuras y de luminosidad intermedia.

Reproducimos el dibujo que hizo el propio Young para explicar el efecto de interferencia de la luz que pasaba por las dos rendijas.

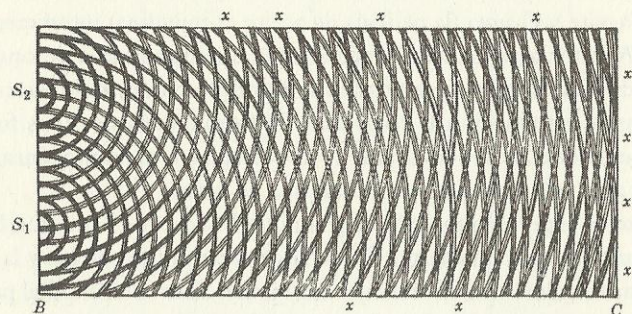


Figura 6.6. Esquema de interferencia dibujado por el propio Young. Para ver el efecto, el lector debe girar el libro y observar el dibujo de manera rasante y en la dirección de propagación.

Young recomendaba mirar el dibujo al ras, de tal modo que, para ver el origen de las franjas claras y oscuras, el lector debe girar el libro y mirar desde la izquierda con la página a la altura de los ojos.

Young no llegó mucho más lejos con este experimento precisamente por sus limitaciones matemáticas. Si hubiera sabido cómo sumar funciones sinusoidales y algo de geometría, habría visto cómo variaban las franjas con la distancia entre las rendijas, con la separación entre éstas y la pantalla, etc. Habría demostrado también cuantitativamente, como debe ser para que el resultado sea incontrovertible, que la naturaleza de la luz es ondulatoria. Recomiendo al lector que navegue un poco por internet para reproducir a su gusto el experimento cambiando esas distancias y las longitudes de onda (colores) de la luz analizada. No es, ni mucho menos, lo mismo que tratar de reproducir el experimento de verdad, pero disfrutará y quedará convencido de que la luz tiene carácter ondulatorio. Al menos hasta que llegue al último capítulo de este libro.

Al lector quizá le interese conocer un aspecto de la vida de Young que es singular y aleccionador, y que requiere una breve digresión.

Durante miles de años, miles, los egipcios escribieron mediante jeroglíficos. Durante muchos siglos después del eclipse de la cultura egipcia, la escritura jeroglífica fue un misterio, a pesar de que en Europa los jeroglíficos eran muy conocidos por lo siguiente. Entre los médicos de la primera Edad Media cundió la creencia de que el betún que impregnaba las momias egipcias era un medicamento magnífico para ciertas dolencias graves. Hubo gran trasiego de producto tan deseado y caro, de manera que mucha gente entró en contacto con los jeroglíficos. De entonces data el inicio del inmenso expolio a que han estado sometidas las tumbas egipcias.

Al final de la última dinastía de faraones, la de los Ptolomeos, se dio la circunstancia de que de alguna manera coexistieron tres culturas: la romana, la griega y la egipcia. Cuando Alejandro Magno murió en 323 a.C., su efímero y vasto imperio fue repartido entre sus tres generales más poderosos. El trono de Egipto cayó en manos de Ptolomeo, hijo de uno de ellos. Coronado como Ptolomeo I, inició la trigésimo cuarta dinastía de faraones. Todos sus sucesores varones se llamaron Ptolomeo, y las mujeres Cleopatra.

La guerra civil romana entre César y Pompeyo involucró indirectamente a Egipto porque el último la perdió y se refugió allí (recuérdese lo que hemos contado en el capítulo 2 sobre la Biblioteca de Alejandría). El faraón Ptolomeo de turno, tataranieta del primero, mandó matar a Pompeyo para congraciarse con César. Pero César era mucho César, y aquello no le gustó nada. La que sí supo cómo congraciarse con él fue su hermana, la Cleopatra de entonces. Tanto se congració que tuvo un hijo con él. Pero a César lo asesinaron, y el imperio se dividió entre su general Marco Antonio y su hijo adoptivo, Octavio. La parte que le tocó a Marco Antonio incluía Egipto, y Cleopatra anduvo lista y también enamoró al general. Octavio le declaró la guerra a Marco Antonio, y éste la perdió. Al general lo asesinaron y Cleopatra se suicidó. Sus hijos varones fueron asesinados y las mujeres vendidas a príncipes locales de medio pelo. Así se acabó el sistema dinástico de Egipto. Aquella era una manera sutil de hacer alta política.

Esto viene a cuento de que en aquella turbulenta y apasionante época se implantaron en Egipto el latín y el griego (este último era ocasionalmente utilizado por los romanos). Durante varias décadas, nadie en aquella región supo interpretar los milenarios jeroglíficos, entre otras cosas porque no se consideraban como una verdadera lengua, ya que no llevaban asociada fonética alguna.

Como hemos dicho, nadie en Europa entendía ni una palabra de lo que significaban los jeroglíficos egipcios. La primera palabra que se aceptó fue «autócrata» que, vaya usted a saber cómo, la tradujo en 1633 un jesuita alemán llamado Athanasius Kircher. Durante la espléndida época ilustrada se puso de moda devanarse los sesos tratando de descifrar los jeroglíficos egipcios, pero los intentos tuvieron poco éxito. Hubo que esperar a la gloriosa consecuencia de aquella época, la Revolución francesa, para que se entendiera algo de aquello.

Napoleón viajó a Egipto con trece barcos repletos de tropas y científicos. Se trataba de echar de allí a los pérfidos ingleses, que se aprovisionaban generosamente de los abundantes frutos del valle del Nilo. De entonces data la famosa frase de la arenga que el general ofreció a sus soldados: «¡Cuarenta siglos os contemplan desde la cima de estas pirámides!».

Los franceses ganaron la guerra, pero el osado Nelson destruyó sus barcos, por lo que tuvieron que quedarse allí mucho más tiempo que los pocos meses previstos para la campaña. Un teniente llamado Pierre François Bouchard, de manera casual, encontró semienterrada una gran losa de forma irregular y muy pesada. Era oscura, de un metro de longitud, más de medio metro de ancho y bastante grosor. La superficie parecía uniformemente granulada, pero en realidad las rugosidades eran inscripciones. Había en ella tres franjas separadas por dos profundos surcos. En la superior las inscripciones parecían jeroglíficos, mientras que en las otras dos había letras, seguramente griegas. La losa se denominó «piedra Rosetta» porque había sido hallada en Rosetta, que era el nombre con que los franceses llamaron al poblado Rashid.

La piedra Rosetta supuso un hallazgo fenomenal porque era la primera vez que los jeroglíficos egipcios iban acompañados por la traduc-

ción a otros dos idiomas fonéticos que, aunque estuvieran tan muertos como el demónico y el griego antiguo, eran en parte descifrables.

El descubrimiento no tardó en hacerse famoso en Europa, y un francés, Silvestre de Sacy, fue el primero en identificar los símbolos correspondientes a Ptolomeo y Alejandro. Un diplomático sueco, Johann Akerblad, que sabía cóptico, el lenguaje de una secta egipcia que utilizaba caracteres griegos pero con el añadido de siete letras demónicas, tradujo los símbolos jeroglíficos «amor», «templo» y «griego».

Aquello, naturalmente, llegó a la Royal Society londinense, y Thomas Young se sintió tan fascinado como todos los demás miembros de la sociedad, pero con la ventaja que le daba su conocimiento de lenguas muertas. Se puso manos a la obra febrilmente e hizo un descubrimiento que puede parecer nimio, pero que en realidad fue sensacional. Las palabras extranjeras no pueden representarse por símbolos porque éstos se basan en un lenguaje determinado. Han de deletrearse fonéticamente. En la piedra Rosetta había grupos de símbolos rodeados por un círculo y separados de los demás que tenían que corresponder a nombres propios extranjeros. Young tradujo cinco de estos círculos, y esto le proporcionó una fama que no había alcanzado con su experimento de las dos rendijas: era mucho más popular descifrar jeroglíficos egipcios que desentrañar la naturaleza ondulatoria de la luz.

Foucault

El movimiento de la Tierra

Durante las cinco o seis primeras décadas del siglo XIX, París marcó muchos hitos decisivos en la historia de Europa y del resto del mundo. Las sucesivas tempestades provocadas por la revolución empezaron a devenir en turbulentas marejadas. A la caída de Napoleón le sucedió la restauración borbónica, pero la maravillosa conversión de súbditos en ciudadanos que había supuesto la revolución había calado demasiado profundamente en el alma de los franceses, sobre todo de los parisinos, y todo intento de dar marcha atrás fue problemático. Volver a lo del derecho divino podía verse como folclore inherente a la monarquía, pero reducir las libertades era harina de otro costal, sobre todo cuando se conoce la eficacia de las barricadas. En cinco días de luchas callejeras, en julio de 1830, hicieron abdicar al rey. Le permitieron nombrar sucesor porque éste fue Luis Felipe, cuya liberalidad e incluso republicanismo parecían sinceros. Pero los poderosos y reaccionarios aprovecharon lo que consideraban debilidad del rey ciudadano, y no hubo época más corrupta, de peores prácticas judiciales y parlamentarismo más vano que la de Luis Felipe.

Las revueltas de febrero de 1848 obligaron al rey a exiliarse en Inglaterra, proclamándose la Segunda República. Pero los monárquicos habían aprendido mucho de cómo funcionaban las barricadas y el régimen duró muy poco. En el verano de ese mismo año acabaron despiadadamente con otro intento revolucionario y, considerando que aquello había que atajarlo de una vez por todas, qué mejor remedio que un gobierno fuerte y, por qué no, imperial. Los reaccionarios fueron a por todas y nombraron emperador nada menos que al sobrino de Napo-

león: de Segunda República se pasa a Segundo Imperio. Cumplir tal proyecto costó unos años y muchos sinsabores, pero en 1851 Napoleón III ya era emperador de Francia. Curiosamente, fue en aquellos años cuando lo que quedaba del imperio francés se fue desintegrando de manera inexorable. Además, la corrupción se acentuó, las libertades se eclipsaron aún más y la paz y el orden que todos anhelaban quedaron en un mero sueño.

A pesar de todos los avatares sociales y políticos por los que pasó Francia en aquella época, hubo un denominador común curioso y esperanzador: desde Napoleón (el grande) hasta el otro Napoleón (el chico, por emplear el furioso epíteto de Victor Hugo desde el exilio), todos los gobernantes mostraron una especial y efectiva sensibilidad hacia las ciencias y sus aplicaciones. Producto de aquella época revolucionaria fueron las grandes escuelas, en particular la Normal Superior, la de Minas y la Politécnica, e instituciones como la Oficina de Longitudes, dedicada a la astronomía, la geografía y la navegación, o el Conservatorio de Artes y Oficios, entre muchas otras. Todo ello favoreció el paso de la Francia aristocrática a la meritocrática.

La eficacia de estas instituciones se reflejó pronto en un desarrollo científico y tecnológico sin par. Nuevos cementos hidráulicos hicieron posible la construcción de puentes y presas de gran envergadura; la electricidad comenzó a aplicarse a la telegrafía y a numerosos procesos industriales; las máquinas de vapor impulsaban fábricas, barcos y trenes; los daguerrotipos exigían cada vez menos tiempo de exposición; la cirugía empezó a contar con la anestesia y la asepsia; la química favorecía la agricultura y la nutrición. Realmente aquella época de la primera industrialización fue excitante.

Jean-Bertrand-Léon Foucault fue un producto representativo de su época y, en buena medida, ésta fue producto de su trabajo. Su experimento más bello y simple, y a la vez más espectacular y mediático, el famoso péndulo al que dedicamos este capítulo, eclipsó su obra, a pesar de que en nuestro siglo XXI aún se utilizan varios de sus inventos. Por eso es justo y conveniente describirlos, apartándolos un poco de la sombra del péndulo.

Foucault nació en París en 1819 y allí murió (sin ausentarse apenas de la ciudad en su corta vida), en 1868. Su padre era un editor y librero que alcanzó cierta notoriedad por los excelentes libros de historia de Francia que publicaba. Un detalle interesante es que se volvió loco y en ese estado murió. A su hijo le pasaría lo mismo. El joven Léon vivió una buena infancia porque su familia tenía una situación económica magnífica gracias no a los libros, sino a las rentas de los numerosos inmuebles que poseía en París. Pero lo mejor fue que sus padres estaban dispuestos a gastar un buen dinero con prodigalidad en la educación del vástago, que además era hijo único. Así que lo mandaron al Colegio Stanislas, el mejor de París. Pero Léon Foucault fue un mal estudiante. Tuvo que repetir más de un curso. Además, el pobre era bastante enclenque, enfermizo y bizco (véase la figura 7.1).

Sin embargo, Foucault dejaba pasmados a todos con su habilidad manual. Sus maquetas de barcos, sus pequeñas máquinas de vapor y sus telégrafos mecánicos eran perfectos y funcionaban con una precisión pasmosa. Siendo malo en matemáticas y bueno en manualidades, la mejor elección para su futuro era, con toda lógica, hacerse cirujano. Con veinte años, en 1839, entró en la insigne Escuela de Medicina de París. Le fue muy bien hasta que vio sangrar a un enfermo. Cayó desmayado. Su animadversión a la sangre le hizo replantearse seriamente el asunto, pero como se había granjeado el aprecio de uno de sus profesores, Alfred Donné, gracias a su insistencia aceptó dedicarse a la microscopía médica.

Por aquella época empezaban a hacer furor los daguerrotipos, que todavía eran imágenes impresas en placas de cobre emulsionadas con betún de Judea disuelto en aceite de lavanda. La intención de Foucault era obtener daguerrotipos de imágenes tomadas al microscopio para enseñanza y deleite de los estudiantes de medicina. Pero aquello era bastante inviable. Sus inventores, Nicéphore Niepce y Louis-Jacques Daguerre, cambiaron pronto el procedimiento recubriendo las placas de yoduro de plata, que, tras casi una hora de exposición al objeto, eran reveladas con vapores de mercurio. Aquello no sólo era lento, sino también peligroso, porque los fotógrafos podían terminar más locos que un

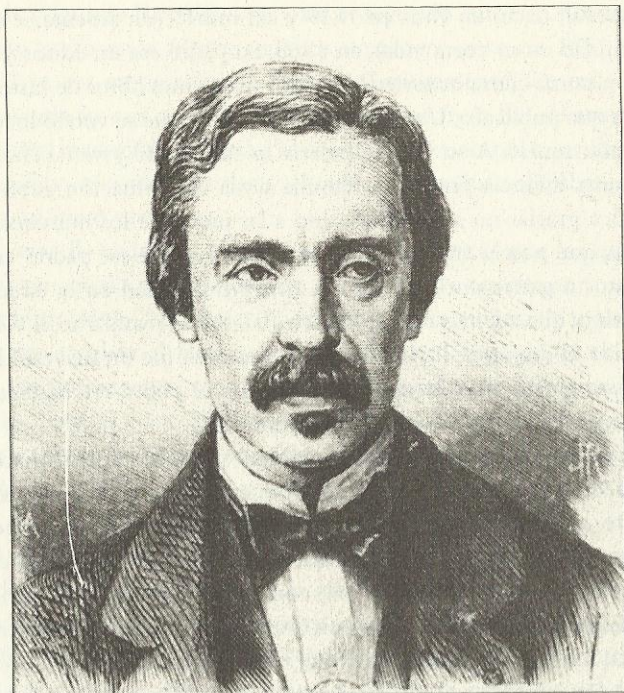


Figura 7.1. Léon Foucault (1819-1868).

sombrerero. Esta comparación viene a cuento de que el término «azogado» (azogue y mercurio son lo mismo) se aplicaba en aquella época al que presentaba los síntomas de los sombrereros ya mayores, porque casi indefectiblemente todos mostraban un extraño comportamiento debido a los vapores de mercurio que utilizaban en sus manufacturas.

Foucault estrechó su amistad con un ex compañero de colegio que también estudiaba medicina pero al que le gustaba tan poco que, igual que él, quería dejar la carrera. Se llamaba Hippolyte Fizeau, y la colaboración entre ambos sería extraordinariamente fructífera, aunque a la larga terminaron distanciándose. Corría el año 1841.

Fizeau fue el que metió a Foucault en la física, pero antes perfeccionaron de manera admirable el daguerrotipo. Fizeau descubrió que el bromo también sensibilizaba las placas y que con cloruro de oro la imagen que se obtenía era excelente. Foucault descubrió una técnica de deposición uniforme e inocua del vapor tóxico de mercurio. Entre los dos lograron daguerrotipos perfectos con exposiciones que variaban entre un segundo y dos minutos. Bajo la dirección de Donné, publicaron un atlas médico que incluía nada menos que ochenta daguerrotipos de fluidos corporales al microscopio, iniciándose así la microfotografía médica. Un año antes, el director del Observatorio de París y secretario de la Academia de Ciencias, el todopoderoso François Arago, les había encargado hacer daguerrotipos del Sol, y las imágenes que obtuvieron fueron formidables.

Foucault y Fizeau, ya completamente dedicados a la física aplicada, iniciaron una fructífera etapa de colaboración: midieron interferencias de lo que ellos llamaban «rayos calóricos», que no eran otra cosa que radiación infrarroja; inventaron los primeros reguladores de los arcos eléctricos, mecanismos que mantenían constante la distancia entre los extremos de los electrodos conforme se iban gastando; consiguieron la transmisión de la hora por conexión eléctrica sincronizada de relojes, etc.

Una de las actividades de Alfred Donné, ex profesor de medicina, de Foucault, era comentar en un periódico parisino muy influyente, *Le Journal de Débats*, las sesiones de la Academia de Ciencias. Lo hacía muy bien pero con frecuencia criticaba a Arago por considerar el Observatorio su coto privado. Cuando dejó de escribir en ese periódico le sustituyó su discípulo Foucault, que, aunque de manera mucho más comedida, también criticaba a Arago. Lo que no podía sospechar era que cuando diez años más tarde crearan el puesto de físico del Observatorio para él, el nuevo director, Le Verrier, iba a gobernarlo con tan férrea autoridad que todos añorarían a Arago.

Léon Foucault siempre trató de ganar dinero con sus inventos y fama con sus descubrimientos. Lo consiguió, pero ni tanto como deseaba ni por las causas que él preveía. El dinero le vino más por pre-

mios y prebendas que por el rendimiento de sus patentes. La fama, o al menos la popularidad, le llegó al principio porque sus reguladores de arcos eléctricos maravillaron a la alta sociedad tras ser instalados en la Ópera de París, realzando aún más su gran esplendor. Estamos en 1849 con las aguas calmadas después de los acontecimientos del año anterior, la efímera Segunda República, y con Luis Napoleón ya instalado en el poder.

Como a todo físico importante, a Foucault le fascinó también el problema de la naturaleza de la luz, que en este libro se está detallando de manera natural. Al fin y al cabo, los experimentos de Young que dejaban sentado el carácter ondulatorio de la luz eran poco conocidos y las teorías de Newton, junto con las de Kepler y Laplace, seguían teniendo tanto éxito que a nadie se le ocurría dudar del carácter corpuscular que ellos predicaban.

Arago tuvo una idea muy interesante: la luz se refractaba, es decir, cambiaba de dirección cuando pasaba del aire al agua. Según el enfoque corpuscular, sobre las partículas de luz se debería ejercer una fuerza para que se desviarán. Tal fuerza tendría que ser perpendicular a la superficie que separaba el aire del agua y aceleraría las partículas. Conclusión: la luz se mueve más rápidamente en un medio denso que en el aire. Pero la velocidad de la luz debe de ser enorme, así que ¿cómo se iba a poder medir no sólo tan alta velocidad, sino también la diferencia entre la que lleva en el agua y en el aire?

Una posibilidad, al menos sobre el papel, como proponía Arago, era la siguiente. Se hace pasar luz a lo largo de un tubo que contiene el medio a estudiar, por ejemplo, agua. Esto se hace reflejando la luz incidente en un espejo situado en un extremo que la refleje en la dirección del tubo. En el otro extremo se coloca un espejo cóncavo que refleje la luz hacia atrás, o sea, hacia el extremo opuesto de donde está el espejo emisor. Si éste gira, la imagen de la luz rebotada se percibirá ligeramente desplazada a una distancia que dependerá de lo que ha tardado la luz en recorrer dos veces el tubo, esto es, de su velocidad en el medio que llena el tubo. Esto está muy bien, pero estamos hablando de unos 300.000 km/s. ¿Cuánto tarda la luz en recorrer un tubo de ocho o diez

metros, que es lo manejable en un laboratorio? ¿Cómo se mide tan pequeño intervalo de tiempo? Ahí entraba la extraordinaria habilidad experimental de Léon Foucault, que no sabía mucha física pero era un maestro fabricando mecanismos de precisión inverosímil. Y los experimentos son los que de verdad revolucionan la física. Además, Arago tenía diabetes avanzada cuando empezó a realizar sus experimentos y su visión se empezaba a resentir, así que no podía distinguir bien los pulsos de luz emitida de la reflejada.

Foucault (y sobre todo su amigo Fizeau) empezó obteniendo valores de la velocidad de la luz en el aire utilizando, en lugar del tubo de Arago, un espejo situado a diez kilómetros a donde se emitía la intensa luz de un arco eléctrico. Pero antes de enviarla a tan distante espejo, la hacía pasar por una rueda dentada que giraba vertiginosamente a una velocidad de giro que podía regular. O sea, que lo que enviaba eran destellos. Graduando la velocidad del engranaje (por cierto, activado por ingeniosísimas turbinas de vapor), conseguía hacer pasar (y detectar de manera inequívoca) la luz reflejada por el espejo por la muesca siguiente a la que lo había dejado pasar. Calculando el tiempo transcurrido entre un diente y otro del engranaje a la velocidad de giro que llevaba la rueda y sabiendo que la luz había recorrido veinte kilómetros en ese breve tiempo, obtuvo un valor de la velocidad de la luz en el aire próximo al aceptado hoy día, pero no exacto. No obtuvo un valor adecuado hasta 1862, pero, con la experiencia adquirida, Foucault abordó la investigación de la diferencia de velocidades en el aire y el agua con tubos de tres o cuatro metros. Su conclusión fue que la luz se movía más deprisa en el aire que en cualquier otro medio más denso. Adiós definitivamente a la teoría corpuscular de la luz. Definitivamente para la época, porque, como ya hemos dicho, la naturaleza corpuscular de la luz reviviría con fuerza unos sesenta años después. Además, este modo de trabajar para medir la velocidad de la luz sería la base para los experimentos de Michelson y Morley, que dieron al traste con la idea de éter y que abrieron el camino a la revolucionaria teoría de la relatividad de Einstein. Pero ésta es otra historia (véase la figura 7.2).

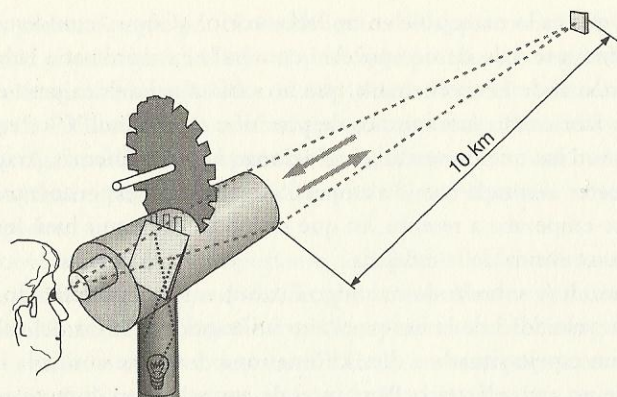


Figura 7.2. Esquema del experimento de Fizeau para determinar la velocidad de la luz en el aire.

Foucault llevó a cabo estos experimentos con su amigo Fizeau, pero lamentablemente la amistad que mantenían desde hacía diez años se fue deteriorando conforme progresaban en sus resultados. El profesor de ambos, Donné, trató de interceder entre ellos, pero no le fue posible y le echó la culpa del desencuentro más a Foucault que a Fizeau. Donné dejó escrito que el carácter de Foucault era cualquier cosa menos amable, tal vez a causa de su ansia de reconocimiento y lo poco atractivo de su aspecto. El caso es que vivía con su madre y nunca se casó. Fizeau y Foucault realizaron por separado sus últimos experimentos sobre la diferencia de velocidad de la luz en distintos medios y, quizá injustamente, nombraron caballero de la Legión de Honor por el descubrimiento sólo a Foucault. Fizeau había llegado a la misma conclusión con sólo siete semanas de retraso. Esto sucedía en mayo de 1850, y estaba a punto de llevarse a cabo el experimento más bello, simple y famoso de Foucault.

¿Gira la Tierra en torno a sí misma? Pues claro, eso ya lo sabían los griegos, y después de Copérnico y Galileo nada se podía argüir sobre el asunto que no fueran razones sobrenaturales. Ya, pero las evidencias de

tal rotación eran astronómicas, es decir, la Tierra gira porque así lo demuestran los movimientos relativos con respecto a los demás planetas y, sobre todo, tomando como referencia las estrellas fijas. Hay un interesante experimento que el lector puede llevar a cabo con una cámara de fotos. Enfoque la estrella Polar (a mitad de camino entre Casiopea y la Osa Mayor), asiente bien el trípode del telescopio, abra el diafragma totalmente y déjela en exposición permanente (posición B del obturador). Cuando revele la foto observará bonitos círculos concéntricos con la estrella Polar en el centro. Los círculos, obviamente, los han producido las estrellas más brillantes. El número de ellos que obtendrá dependerá de la sensibilidad de la película que haya utilizado. ¿Qué mejor prueba de la rotación de la Tierra puede haber que ésta? Algunos griegos antiguos decían que lo que giraba era la esfera celeste a la que estaban fijadas las estrellas, pero bueno...

Otra forma de probar, sin necesidad de recurrir a las estrellas, que la Tierra gira la propuso Galileo con el asunto de las mareas, pero no era concluyente porque también recurría a agentes externos, en este caso la Luna.

¿Por qué no notamos el giro de la Tierra sin necesidad de relacionarlo con el firmamento? Una vuelta cada veinticuatro horas hace que su velocidad de giro sea... 0,0007 revoluciones por minuto. Realmente es muy pequeña para notarla así, sin más. Veamos paso a paso qué se le ocurrió al pequeño gran Foucault para solucionar este problema.

Estaba experimentando con una varilla de acero flexible ajustada por un extremo al mandril de un torno. El mandril es el mecanismo de uñas que sujeta la pieza que se va a tornearse. O sea, que hacía girar la varilla. Al mismo tiempo la ponía a vibrar, combinando así un movimiento oscilatorio con otro de rotación. Observaba que, a pesar de que la varilla giraba en torno a su eje, el plano de vibración no giraba, manteniéndose siempre tal como había empezado a oscilar. Por ejemplo, si se desplaza el extremo libre de la varilla hacia arriba y se suelta, empieza a oscilar en un plano perpendicular al suelo. Parece lógico que cuando se conecta el torno y la varilla se ponga a girar, dicho plano de vibración gire también. Pues no, la varilla se mantiene siempre oscilando hacia

arriba y hacia abajo. Incluso hoy día sigue sorprendiendo tal efecto, a pesar de que se debe a algo tan antiguo como la ley de la inercia de Newton, es decir: si sobre un cuerpo en movimiento no actúa ninguna fuerza externa, dicho movimiento se mantiene indefinidamente. Que el torno gire no supone aplicar fuerza alguna al movimiento vibratorio; por tanto, éste se mantiene inalterado. Y fue en este punto cuando Foucault tuvo una gran idea. Como siempre, la inspiración llega cuando se está trabajando, no predisponiéndose a que le llegue estando en actitud contemplativa. Un péndulo oscilando sobre la Tierra se comportaría como la varilla en el torno: manteniendo su plano de oscilación aunque la Tierra se mueva debajo. Como nosotros mismos estamos ligados a la Tierra y girando con ella, lo que veríamos es que el plano de oscilación del péndulo varía, del mismo modo que cuando vamos en un tren se puede considerar que lo que se mueve es el paisaje y lo inmóvil es el tren.

Foucault se puso manos a la obra e instaló su primer péndulo en casa. Consistía en una bola de latón de cinco kilos suspendida de un hilo de acero de dos metros de largo. Aquello fue un desastre: el péndulo se volvía loco y además el hilo se rompió. ¿Qué era eso de volverse loco? Recordemos otra vez el principio de inercia y lo lento que es el giro de la Tierra. Para hacer oscilar el péndulo, lo primero que se nos ocurre, como a Foucault, es coger la bola con las manos, separarla un poco de su punto de equilibrio y soltarla, ¿no? Pues tan sólo con el ligero temblor de las manos se le aplica al péndulo una fuerza lateral, de manera que las oscilaciones, en lugar de estar en un plano, comienzan a describir elipses cada vez más achatadas. Si esto se une a otro efecto que comentaremos después, el movimiento del péndulo puede terminar entrando en lo que se llama «régimen caótico». Tenemos que encontrar una desviación provocada por un giro de 0,0007 revoluciones por minuto, o sea, desviaciones tan pequeñísimas del plano de oscilación que si el impulso inicial no se produce exactamente en la dirección de oscilación, aquéllas quedan enmascaradas.

El siguiente péndulo lo instaló Foucault cinco días después del primer fallo. Para evitar que se produjese algún desplazamiento transversal

del impulso inicial desarrolló una de sus ingeniosas ideas. En lugar de desplazar con las manos la bola suspendida del techo por el hilo de acero, la amarró a una cuerda, bajo la cual colocó una vela encendida. Cuando la llama la rompió, el péndulo se puso a oscilar sin fuerza alguna en dirección distinta al plano de oscilación. Después de un buen rato, observó que el plano de oscilación se desviaba unos milímetros. Era el 3 de enero de 1851. Había obtenido la primera prueba de que la Tierra se movía sin necesidad de observar las estrellas.

Arago todavía era director del Observatorio de París. Al tener conocimiento del experimento de Foucault, lo invitó a instalar un péndulo en el Observatorio porque allí el hilo podía tener once metros de largo. ¿Por qué ha de ser largo el hilo? Desde Galileo se sabía que si las oscilaciones son de pequeña amplitud, el periodo del péndulo en un mismo lugar depende exclusivamente de la longitud del hilo. Cuanto más largo sea éste, más lentas son las oscilaciones. Así, tras un majestoso ir y venir, la Tierra habrá tenido tiempo de moverse apreciablemente bajo el péndulo y hacerse más palpable el cambio de posición del plano de oscilación.

Gracias al nuevo éxito del péndulo del Observatorio, Foucault pudo presentar sus conclusiones en una de las sesiones de los lunes de la Academia de Ciencias. Con palabras extraordinariamente sencillas y claras, explicó que el plano de oscilación del péndulo daría una vuelta completa en un día si se situaba exactamente en uno de los polos de la Tierra, no giraría en absoluto en ningún punto del ecuador y en cualquier otra latitud giraría a razón del seno de dicha latitud. Veamos cada una de estas situaciones. El lector puede ayudarse con el globo terráqueo de sus hijos o comprarse uno escolar, que siempre es instructivo. Cuando lo haga girar con una mano, con la otra debe hacer oscilar un dedo manteniendo siempre el mismo plano de oscilación con respecto a los objetos de la habitación en que se encuentre.

En el Polo Norte, por ejemplo, la cosa es fácil de entender. Supongamos que tomamos como referencia la puerta de la habitación y una ventana que hay enfrente de ella. Movemos el dedo sobre el Polo siem-

pre en la dirección puerta-ventana y damos vueltas al globo. El plano de oscilación, visto desde la helada Tierra, habrá dado una vuelta completa cuando así la complete la Tierra.

Ahora nos vamos al calor asfixiante del ecuador. Tomamos como referencia el suelo y el techo. Hacemos oscilar el dedo en un lugar, por ejemplo sobre Quito. Ahora tenemos que acompañar con el dedo oscilante el giro del globo. El plano permanecerá invariable del suelo al techo durante toda la vuelta. Entender cualquier situación intermedia ya es fácil, y si al lector no se le han olvidado las matemáticas sencillas, concluirá que el tiempo que tarda un péndulo en que su plano de oscilación dé una vuelta completa es 86164 dividido por el seno de la latitud del lugar donde se encuentre. (El número son los segundos que tiene un día sideral, es decir, 23 horas, 56 segundos y 4,091 segundos.) Esta regla, que el propio Foucault aportó en la Academia con cierta prevención, no es rigurosa; ya veremos por qué.

El todavía presidente de la República francesa, Luis-Napoleón Bonaparte, que después se reconvertiría en el emperador Napoleón III, otorgó a Foucault un premio de 10.000 francos y le pidió que instalara un péndulo en el Panteón. Se trata del famoso péndulo de Foucault: medía 67 metros, pesaba 28 kilos y tardaba 16,4 segundos en dar una oscilación completa. (El peso de la bola del péndulo no influye en nada más que en mantener tenso el cable del que está suspendida). Un punzón en el extremo inferior de la bola trazaba un surco en una base cubierta de arena húmeda. La resistencia del aire y de la arena amortiguaba las oscilaciones de manera que el péndulo se paraba cada cinco o seis horas, pero durante ese tiempo el plano de oscilación había girado entre sesenta y setenta grados en el sentido de las agujas del reloj, tal como estaba previsto. Al Panteón acudían oleadas de gente atraídas por ver cómo giraba la Tierra bajo el péndulo, pues esto era lo que ponía en evidencia el experimento (véase la figura 7.3).

Estoy casi seguro de que a todos los niños que han terminado siendo físicos sus padres les habrán recriminado infinidad de veces sus ganas de enredar en exceso. Como el siguiente párrafo puede que el lector lo considere generado por eso, por ganas de enredar, puede saltárselo, pero

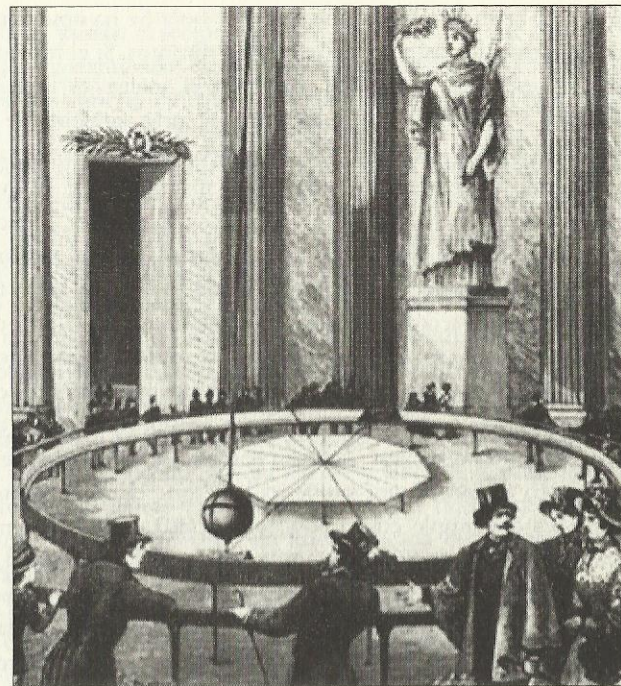


Figura 7.3. Ilustración del péndulo de Foucault en el Panteón de París.

es que el problema del péndulo de Foucault es mucho más complejo de lo que parece.

Al mencionar el tren y el paisaje, hablaba de sistemas de referencia. Supongamos que un viajero trata de colocar una pequeña maleta en la repisa portaequipajes cercana al techo y se le cae encima de un pie. Un pasajero vecino sonríe aliviado porque no se ha hecho daño, y después considera que la maleta ha caído en línea recta desde la repisa al pie del pasajero. El suceso lo observa también otra persona desde la estación de la que acaba de salir ese tren. Ha visto que la maleta se caía cuando estaba a unos metros de él y le daba en el pie al pasajero justo cuando pa-

saba frente a él. La maleta ha descrito una parábola. Se ha observado un movimiento desde dos sistemas de referencia distintos. Si el movimiento relativo de esos dos sistemas es rectilíneo, el análisis es sencillo. Si uno de los dos es acelerado, hay que esperar al curso siguiente de física para entenderlo, y si uno de los dos es curvilíneo, otro curso más. La Tierra gira de modo uniforme: siempre tarda lo mismo en dar una vuelta completa. Pero eso no implica que no haya aceleraciones. Un coche puede mantener exactamente la misma velocidad, pero al tomar una curva aparecerá una aceleración centrípeta que lo empuja hacia fuera. En el caso de una esfera, como es muy aproximadamente la Tierra, cuando gira aparece además una aceleración de este estilo, aunque algo más sutil, que se llama «de Coriolis», responsable de los movimientos ciclónicos de la atmósfera cuando aparecen bajas presiones locales y de las principales corrientes oceánicas. También complica la trayectoria de proyectiles de largo alcance. Y, por supuesto, hace que el movimiento del péndulo no sea tan simple como Foucault expuso en la Academia; es decir, que ni el periodo es 86164 dividido por el seno de la latitud, ni el plano de oscilación es perfectamente plano por más que hayamos cuidado el impulso inicial. El péndulo describe una especie de roseta que cuando va hacia un extremo se curva hacia un lado y cuando regresa va hacia el opuesto. Si la arena húmeda del Panteón hubiese sido lo bastante tupida y el punzón perfectamente puntual y hubiéramos observado los surcos con un microscopio, habríamos visto que éstos formaban elipses. Si a esto añadimos que el punto de suspensión del péndulo también está sometido a aceleraciones, el movimiento de la bola se hace realmente complicado, pero como una buena primera aproximación vale la del plano y periodo de oscilación predicho por Foucault. De hecho, un péndulo instalado en la Guayana Francesa, cerca del ecuador (en concreto a $4^{\circ} 56'$ de latitud) tardó 278 horas y 19 minutos en hacer una rotación completa. El del Panteón ($48^{\circ} 50'$) lo hizo en 31 horas y 47 minutos. Y otro instalado en Sidney (34°) tardó 43 horas, pero, eso sí, en sentido contrario a los del hemisferio norte. El lector curioso puede comprobar la exactitud de estas mediciones con una calculadora de bolsillo.

Como ya sabe el lector, me gusta recomendarle que trate de llevar a cabo los experimentos que se explican en este libro, siempre que sean viables con mucho cuidado y pocos medios. Podría pensar que ahora voy a incitarle a instalar un péndulo. No se lo aconsejo, entre otras cosas porque hace falta suspenderlo a una altura considerable de un recinto cerrado para evitar corrientes de aire, y termina parándose en pocas horas. Pero es un bonito proyecto para algunos edificios de viviendas o públicos. Para que el péndulo no se detuviese, el propio Foucault inventó un procedimiento electromagnético que hoy día ha evolucionado hasta un alto grado de sencillez y exactitud. Es muy barato y no consume apenas electricidad. Hace unos años se instaló uno en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada. Si al lector le da por convencer a la comunidad de su bloque de pisos de instalar un maravilloso péndulo de Foucault que dé la hora exacta y sirva de agradable entretenimiento a los vecinos y de instrucción a sus hijos, puede ponerse en contacto con los profesores de física aplicada de esa universidad, que seguramente estarán encantados de ayudarles.

¿Qué pasó con Foucault después del éxito de crítica y público de su bello experimento? Pues que inventó y descubrió cosas más importantes que el péndulo, muchas de las cuales aún tienen enorme utilidad. A pesar de ello, los años pasaban y a los treinta y tantos años Foucault seguía sin empleo fijo. Para colmo, su candidatura a la Academia de Ciencias fue rechazada en varias ocasiones. En estas injustas circunstancias influían de forma negativa dos cosas. Por un lado, Foucault no provenía de ninguna de las grandes escuelas y, como he indicado, su formación teórica era más bien endeble; de hecho, no obtuvo el doctorado hasta 1853 y lo defendió pobremente por culpa de sus lagunas matemáticas. Por otro lado, su carácter altanero y taciturno provocaba bastante rechazo.

Sería decepcionante que el lector considerara, leyendo estas notas sobre Foucault, que éste era poco más que un manitas. Por eso, antes de describir brevemente su siguiente invento, el giroscopio, creo que es justo dar pistas de la profundidad de su pensamiento.

Foucault creyó, equivocadamente, que el movimiento del plano de oscilación del péndulo indicaba el carácter absoluto del espacio. Décadas

después, un físico fenomenólogo llamado Ernst Mach rechazó esta opinión sosteniendo que eran las estrellas lejanas las que constituían sistemas de referencia no acelerados. Respecto a ellas es como se pueden medir sistemas que rotan. Dicho de otra forma, si la Tierra estuviera en un universo vacío, no giraría (no podríamos saber si gira o no). Las fuerzas centrífugas y de Coriolis desaparecerían y el péndulo no cambiaría su plano de oscilación. Estas ideas no son vanas, pues el propio Einstein, varias décadas más tarde, se las tomó tan en serio que a partir de ellas formuló la teoría general de la relatividad, o sea, la gravitación universal de hoy día. Los sistemas de referencia absolutos sólo tienen validez a nivel local. Esto es difícil de explicar, pero el asunto es que un cuerpo en rotación, por ejemplo la Tierra, deforma muy ligeramente el espacio y el tiempo de manera que, por ejemplo en los polos, esta deformación, el efecto Lense-Thirring, es igual a unas dos décimas de segundo de arco por año. Este efecto se ha medido e indica una rotación absoluta sin necesidad de considerar las galaxias lejanas para definir un sistema de referencia.

Por supuesto, Foucault no sabía nada de esto, pero, como intuía que lo del seno de la latitud era una chapuza conceptual, pensó y repensó sobre un posible movimiento rotatorio independiente de la latitud. Un año más tarde de lo del péndulo, descubrió el giroscopio, un dispositivo que se mueve libremente pero que monta una rueda giratoria cuyo eje de rotación no cambia y su lenta deriva con respecto a la Tierra es observable sólo al microscopio. Al poder mantenerse apuntando al Polo Norte geográfico y no al magnético, el giroscopio fue sustituyendo a las brújulas en los barcos, porque además no resultaba alterado por las masas de metal del propio barco ni por los cambios en el magnetismo terrestre. Los giroscopios son hoy día esenciales para mantener el rumbo de aviones e incluso de naves espaciales (véase la figura 7.4).

Foucault siguió investigando y realizando mediciones fotométricas de la luz de gas obtenido de la turba y usado para iluminación, de la conductividad eléctrica y térmica de los líquidos, hasta que llega el año 1855, que le depara buenas venturas. Con treinta y seis años obtiene un puesto fijo como físico del Observatorio de París, su péndulo instalado en la Exposición Universal es fuente de orgullo y diversión, y Napoleón III anun-

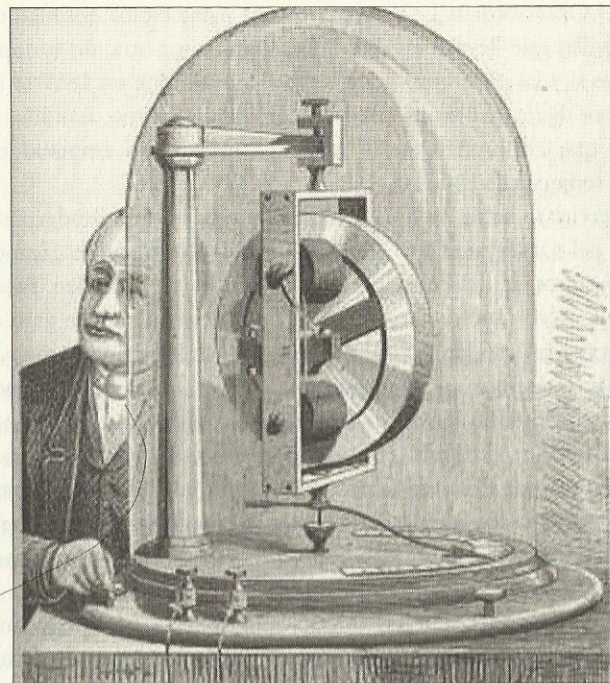


Figura 7.4. Ilustración del giroscopio de Foucault.

cia que financiará todas sus experiencias futuras. Para colmo de dicha, la Royal Society de Londres le concede la distinguida medalla Copley. Pero, eso sí, la Academia Francesa sigue rechazando su candidatura.

De ese mismo año datan algunos de sus descubrimientos que todavía hoy se enseñan a los estudiantes de física, como la equivalencia entre el trabajo y el calor o como la naturaleza de las corrientes eléctricas que surgen en un metal cuando se mueve dentro de un campo magnético. Sin embargo, de ese mismo año data un inquietante escrito de su antiguo profesor Donné en el que muestra su preocupación por el estado mental de Foucault.

En el Observatorio, Le Verrier, por una parte estaba encantado con las maravillas que llevaba a cabo el físico, pero, por otra, no se soportaban entre sí y las discusiones entre ellos hicieron que en 1857 el insigne director dijera que «Foucault debe considerarse como dimitido». Menos mal que Foucault tenía el apoyo del mismísimo emperador, que impidió semejante maniobra.

Le Verrier le había dicho a Foucault que había que modernizar los equipos del Observatorio y que debía construir una lente gigante, de 74 centímetros de diámetro, para un telescopio tipo Galileo. Foucault sugirió que sería mucho mejor uno de tipo Newton con un gran espejo. Le Verrier insistió, pero Foucault se puso a trabajar en el espejo. Esto suponía un desafío muy serio, porque fabricar un espejo de curvatura exacta y reflectividad apropiada requería un método muy distinto a los tradicionales. Lo consiguió con vidrio metalizado y por un procedimiento fascinante. Primero fabricó espejos de entre 10 y 22 centímetros, y llegó hasta los 80 para un telescopio que se instaló en Marsella. Era el más grande del mundo, pero lo importante fue que gracias a dicho procedimiento se inauguró la era de los telescopios gigantes.

La Academia de Ciencias admitió en su seno a Léon Foucault en 1865, a la sexta tentativa. Aunque su salud se iba deteriorando, Foucault siguió haciendo maravillas con sus arcos eléctricos, que ya se utilizaban en numerosos faros costeros; sus reguladores y giroscopios se incorporaban a la Marina; la nueva Exposición Universal exponía decenas de inventos suyos, etc.

Los problemas con Le Verrier no se habían suavizado en ningún momento, y aquello amargó los últimos años de Foucault. En julio de 1867, con cuarenta y ocho años, empezó a notar los primeros síntomas de parálisis, y siete meses después moría de una fulminante esclerosis en placas. La gente le diagnosticó agotamiento y ansiedad.

Aunque su carácter arrogante le creó muchos enemigos y pocas simpatías, Donné dejó escrito que, a pesar de ello, «la fidelidad en la amistad de Foucault era a toda prueba». Por eso algunos hombres notables, como el químico Deville, hicieron las más ardorosas defensas de su persona a modo de rendido epitafio.

Millikan La unidad de carga eléctrica

En los anales de la Universidad de Oxford se recoge la siguiente anécdota del año 1890 (en inglés e imaginándose uno el acento de Oxford resulta más divertida, pero en español tampoco está mal): el examinador le pregunta al candidato a graduado: «Dígame qué es la electricidad». El estudiante responde: «¡Oh! Eso lo he estudiado a fondo. Aún más, lo he entendido a la perfección. Pero, lamentablemente, lo he olvidado». El profesor responde contrariado: «¡Qué mala suerte! Sólo dos seres han entendido lo que es la electricidad, el Autor de la Naturaleza y usted. Y ahora resulta que a uno de los dos se le ha olvidado».

El siglo XIX bien podría caracterizarse por la electricidad, porque en su transcurso se desarrollaron los conceptos y aplicaciones que aún siguen siendo válidos. De la electricidad y también del magnetismo, puesto que ambos quedaron maravillosamente unificados por Maxwell en unas ecuaciones de rigor inalterado a pesar de las grandes revoluciones de la física acontecidas en el siglo posterior. Los motores, acumuladores, baterías, transformadores, etc., tan habituales hoy día, difieren poco de los que se inventaron en el siglo XIX. Sin embargo, el siglo terminó como indica la anécdota narrada: con el desconocimiento de qué era la electricidad.

Un delicioso texto de física al que le tengo especial apego, escrito por Eduardo Lozano y Ponce de León, define así la electricidad: «Es una forma de energía que se caracteriza por diversos fenómenos; verbigracia, etc., etc.». El libro está fechado, en su cuarta edición, en 1896. El lector dirá, con razón, que decir eso y no decir nada es casi

lo mismo, pero he consultado varios libros análogos de la misma época, uno alemán, otro americano y dos franceses, y la definición que hacen de la electricidad es parecida: la definen en función de los fenómenos que produce, no de lo que es en sí misma. El único de esos libros que muestra interés por el asunto es precisamente el de don Eduardo Lozano. Cita la hipótesis de un tal Symmer, «que admite dos fluidos muy tenues: el uno positivo o vítreo, y el otro negativo o resinoso, de propiedades antagonistas que se neutralizan al combinarse». Lo de vítreo y resinoso hace mención al hecho de que una varilla de vidrio se carga eléctricamente de una manera («positiva», se decía) al frotarla con una tela de seda, y una barra de lacre o un trozo de ámbar, frotado con una tela de lana, se carga de manera opuesta (negativa). Estos fenómenos se conocían de tan antiguo que la palabra «electrón», de la que proviene electricidad, fue introducida por Tales de Mileto seiscientos años antes de Jesucristo y no significa otra cosa que «ámbar amarillo» (ηλεκτρον). El texto de don Eduardo cita a continuación la hipótesis de Franklin diciendo que «el insigne sabio admitía un solo fluido que obra por exceso o por defecto del que ordinariamente presentan los cuerpos; y de aquí los nombres de fluido positivo y negativo con que se los designa». Lo que honra al autor es la duda que manifiesta en el añadido de que «estas hipótesis se prestan bastante bien para explicar los fenómenos eléctricos, y no hay inconveniente en seguirlas con tal de que procuremos no abusar de la admisión de fluidos de dudosa naturaleza, y no atribuirles mayor alcance del que en realidad tienen, que se reduce a expresar los hechos de un modo abreviado». En una edición posterior del libro, ya en los albores del siglo xx, don Eduardo comenta a pie de página: «Pero el descubrimiento de los electrones o iones, el catión o positivo, y el anión o negativo, que se han ideado para explicar multitud de fenómenos, parece resucitar la teoría de los fluidos eléctricos».

Así estaban las cosas en una época en que las calles se veían iluminadas por bombillas eléctricas, los nuevos motores habían sustituido a las máquinas de vapor en las fábricas, los tranvías circulaban soltando chispas por los troles y todos se estaban acostumbrando a las delicias

técnicas que proporcionaba la electricidad. Lenin definió una vez su revolución como «electricidad más soviets».

La palabra mágica que surge entre una edición y otra de las citadas del libro de Eduardo Lozano es «electrón». ¿Qué era esto del electrón?

Se sabía desde los tiempos de los griegos que la parte indivisible de la materia estaba formada por átomos. Los químicos de la época estaban haciendo cosas portentosas basándose en ese concepto junto con el de molécula, agregado de varios átomos que definían los distintos compuestos que forman la naturaleza. Así pues, el electrón era el átomo de la electricidad. ¿De qué estaban formados los átomos? De nada: eran elementales. O sea, que hay átomos de muchas clases que se distinguen unos de otros en ciertas propiedades que confieren a las moléculas y, en definitiva, a la materia. Como bolitas de distintos pesos, colores, textura, etc. Entonces la electricidad es una forma de materia, ¿no? Por este camino no se iba a ninguna parte, y los más eminentes físicos lo sabían.

Un grupo de estos últimos, alemanes casi todos, estaban haciendo por aquella época unos experimentos fascinantes. Consistían en ampollas de vidrio de formas variadas en cuyos extremos interiores se colocaban dos placas metálicas conectadas externamente a potentes baterías. Estos predecesores de los actuales tubos de neón eran tan llamativos que hacían las delicias de audiencias populares de ciudad en ciudad.

Los tubos irradiaban luces de colores, mostraban franjas luminosas y oscuras, emitían fluorescencias y otras maravillas. A la placa metálica cargada negativamente se le llamaba cátodo, y a la otra, la positiva, ánodo. ¿A qué se debían esos fenómenos? Lo único que parecía claro era que los rayos surgían del cátodo y se dirigían hacia el ánodo. Por eso se les llamaban rayos catódicos (véase la figura 8.1).

La hipótesis lógica acerca de la naturaleza de estos rayos era que se trataba de ondas que viajaban a través del éter, que, como recordará el lector, era el medio sutil que impregna toda la materia. A través del éter se propagaban las ondas de luz de manera del todo análoga a como lo hacía el sonido en el aire. ¿De qué dependía la variedad de colores y fenómenos que tenían lugar en los tubos de rayos catódicos? Fundamentalmente, del tipo de gas que contenía y de su enrarecimiento.

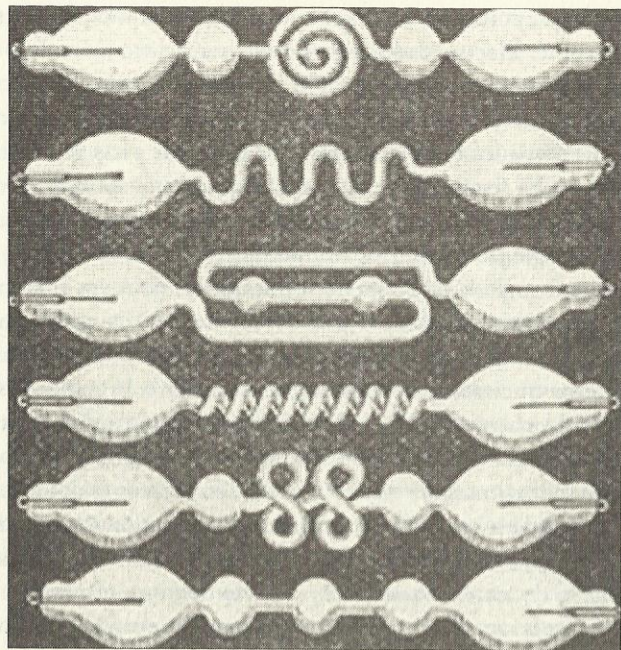


Figura 8.1. Distintos tubos de rayos catódicos que se empleaban como demostraciones populares.

Los gases apenas transmiten la electricidad, de manera que para que salte la chispa entre dos esferillas cargadas y separadas a sólo un centímetro en aire a la presión atmosférica (en las unidades de la época esta presión equivalía al peso de una columna de mercurio de 760 milímetros, que expresaremos como mmHg) hacen falta 30.000 voltios. Sin embargo, la conductividad aumenta a medida que disminuye la presión del gas.

Si un tubo de rayos catódicos se conecta a una bomba de vacío y entre el cátodo y el ánodo se establece una diferencia de potencial de varios miles de voltios, a medida que disminuimos la presión empiezan a tener lugar los fenómenos citados.

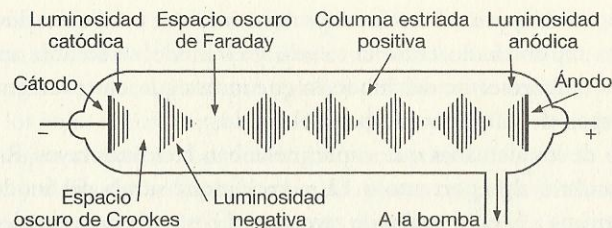


Figura 8.2. Esquema de un tubo de rayos catódicos donde se muestran las distintas franjas que pueden aparecer.

Cuando la presión baja hasta unos 10 mmHg, aparecen descargas disruptivas muy tenues que aumentan en número a medida que se rarifica el gas interior. A unos 5 mmHg, las descargas llenan el tubo adquiriendo una luminosidad cuyo color depende del gas que contiene: violeta con aire, rojo anaranjado con neón, azul con argón, etc. Cuando la presión baja aún más, hasta décimas de mmHg, aparecen franjas oscuras entre el cátodo y el ánodo, en el entorno de los cuales surgen luminosidades azuladas. A menos presión todavía, a 0,001 mmHg, el espacio oscuro casi llena el tubo, pero en torno al ánodo aparece una luz verdosa fluores-

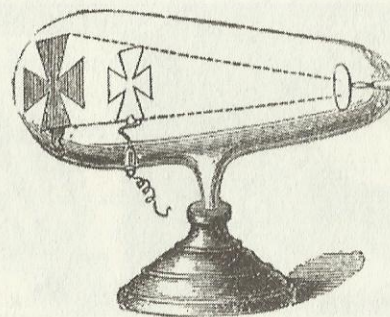


Figura 8.3. Dispositivo que muestra que los rayos catódicos se dirigen del cátodo (-) al ánodo (+) determinando así el carácter negativo de aquéllos.

cente (como la que emana de ciertos minerales que contienen flúor). Si se coloca un obstáculo entre el cátodo y el ánodo, su sombra aparece en la pared fluorescente del ánodo, lo que indica que, efectivamente, los rayos surgen del cátodo y van hacia el ánodo.

Uno de los alemanes que experimentaban con estos rayos, Roentgen, descubrió algo portentoso. La radiación que surgía del ánodo y la pared cercana a él en un tubo de rayos catódicos tenía unas propiedades curiosísimas: producía fluorescencia en una pantalla de platinocianuro de bario, atravesaba diversos espesores de cuerpos opacos, ennegrecía placas fotográficas e ionizaba (electrificaba) los gases. Había descubierto los rayos X, que denominó así, X, la letra que en matemáticas denota la incógnita, precisamente por eso, porque no tenía ni idea de lo que eran. La maravillosa técnica de la radiografía había sido descubierta para bien de la medicina y, por tanto, de la humanidad.

Numerosos buenos investigadores de diferentes países pusieron todo su ingenio y su talento en tratar de dilucidar la naturaleza y la composición de los misteriosos rayos catódicos. Que estaban relacionados con la electricidad era obvio, porque se producían entre dos metales sometidos a una diferencia de potencial de miles de voltios. Además, tenían que ser negativos, porque era indudable que surgían del cátodo (el elec-

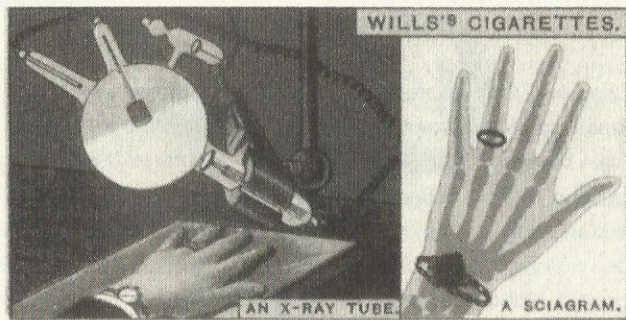


Figura 8.4. Tarjeta anunciadora de unos cigarrillos a principios de siglo que muestra la popularidad que alcanzaron los rayos X.

trodo negativo) y se sentían atraídos por el ánodo (el positivo), y no era cuestión de dudar de una verdad tan establecida como la que indicaba que cargas de signo opuesto se atraen y del mismo se repelen.

Si los rayos tenían carga eléctrica negativa, deberían verse desviados por campos eléctricos. Los investigadores, a mitad de camino entre el cátodo y el ánodo, colocaban otras dos placas cargadas eléctricamente para intentar comprobar si los rayos se desviaban hacia la positiva. Pero esa desviación no se producía.

Si la naturaleza de esas cargas eléctricas de los rayos era corpuscular, un campo magnético debería desviarlos, pero al colocar un potente imán en el interior del tubo tampoco sucedía nada.

Si los rayos catódicos no eran chorros (fluidos) de minúsculas bolitas (corpúsculos) cargadas negativamente, tenían que ser pura luz, pero no estaba claro que se comportaran como tal y produciendo refracciones y difracciones típicas de la naturaleza ondulatoria. Estos experimentos fueron más difíciles y menos concluyentes que con los campos eléctrico y magnético, pero ahí estaban sus resultados.

La única solución que quedaba era que los rayos catódicos tuvieran su origen en los átomos o moléculas del gas que quedaba en el tubo porque, por más alto que fuera el vacío que se hiciera en su interior, siempre quedarían miles de millones de aquéllos. Para que el lector se haga una idea de cuántas moléculas de gas contiene un tubo de éstos, piense que si fueran bolitas de un centímetro de diámetro, como perlas, y las pusiéramos unas junto a otras, se llenaría Europa, desde Algeciras hasta los Urales, con un espesor de perlas de decenas de kilómetros.

Un inglés, Joseph John Thomson, puso un empeño especial en extraer la máxima cantidad de gas de un tubo de rayos catódicos haciendo en su interior el más alto vacío alcanzado en la época. Llegó a un punto en que los rayos catódicos se veían desviados por los campos eléctrico y magnético.

Las conclusiones fueron espectaculares. Primera: los átomos y las moléculas del gas remanente no tenían nada que ver en el asunto; de hecho, los rayos catódicos no eran curvados por los campos eléctricos porque el gas remanente se convertía en conductor eléctrico de mane-

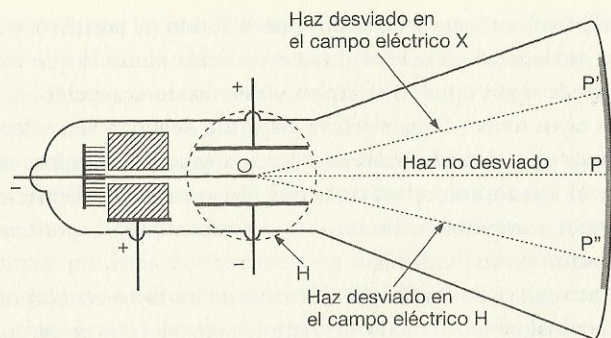


Figura 8.5. Esquema de un tubo de rayos catódicos en los que se someten a la influencia de un campo eléctrico y otro magnético para estudiar su naturaleza a partir de las posibles desviaciones provocadas por éstos.

ra que neutralizaba la acción sobre aquéllos. Segunda: los rayos no eran tales, sino chorros de corpúsculos cargados negativamente. Tercero: aplicando las leyes bien conocidas de cómo actúan un campo eléctrico y otro magnético sobre una partícula cargada, las desviaciones predichas por las fórmulas se reproducían muy bien si la carga de esas partículas era enorme y su masa muchísimo más liviana que la del átomo más ligero, el de hidrógeno. ¿Cómo de enorme era esa carga eléctrica? Como las que entraban en juego en los experimentos químicos de electrolisis, pilas, baterías, acumuladores, etc. Los químicos especialistas en estas cosas hablaban con soltura de «electrón», aunque refiriéndose a los átomos que en sus experimentos adquirían misteriosamente carga eléctrica. En concreto, la palabra «electrón» referida a estos átomos cargados, que después y hasta hoy se llamaron «iones», fue acuñada por un tal G. Johnstone Stoney en 1891. La relación entre la masa y la carga del electrón era unas dos mil veces menor que la del átomo cargado de hidrógeno.

Así pues, los misteriosos rayos catódicos eran chorros de partículas muy ligeras cargadas eléctricamente de manera muy intensa y negativa.

¿Esto solucionaba el problema o lo agudizaba? Esto complicaba las cosas hasta tal extremo que desde los atomistas griegos no se había producido una revolución igual en cuanto al conocimiento de la estructura de la materia. El cátodo del que surgían los electrones estaba hecho, como todos los materiales, de átomos. ¿Cómo podía surgir una partícula de un átomo si por definición éste era indivisible, o sea, no compuesto por partes más simples?

El propio Thomson (junto con otros insignes físicos, como lord Kelvin, también apellidado Thomson) ideó el primer modelo en que los átomos tenían estructura. Eran unas minúsculas bolitas de la textura de una esponja (un bizcocho, decían ellos) de carga eléctrica positiva. En los poros e intersticios estaban embebidos, como las pasas en los bizcochos, los ligeros y aún más pequeños electrones en una cantidad tal que la carga eléctrica negativa de todos ellos compensaba exactamente la carga positiva de la esponjita. En los procesos químicos como la electrolisis y en los fenómenos eléctricos como los descritos, algunos electrones superficiales escapaban y el átomo quedaba cargado positivamente en forma de ión. Los electrones liberados fluían en el medio dando lugar a la electricidad.

Tal modelo duró un suspiro, porque un átomo así sería inestable y toda la materia habría desaparecido poco después de haberse creado. Hablaremos de esto en el próximo capítulo.

Desde que el hombre afiló bordes y puntas de piedras que lo mismo servían para facilitarle la caza y dejarle tiempo para pensar en otras cosas que para abrirle la cabeza al osado que se internara en el territorio de su clan, la ciencia y sus aplicaciones han sido decisivas en el devenir de la humanidad. La política (con la guerra como su expresión trágica), la filosofía (con la religión entre ella y la anterior) y el bienestar social (con la economía decidiéndolo) se han visto influenciados, si no condicionados, por los avances científicos. En la época en que estamos situados, principios del siglo XX, quizá sorprenda al lector saber que el asunto del electrón entró a formar parte de las más prominentes obras filosóficas y políticas. Lenin, al que muchos consideran como la figura más destacada y decisiva del siglo, porque se atrevió y casi consiguió revolucionar la es-

estructura social del mundo en su conjunto, no fue ajeno al electrón. En su obra *Materialismo y empiriocriticismo*, publicada muy poco después de los descubrimientos que estamos explicando y anterior en sólo dos años al experimento decisivo que describiremos, escribe: «El electrón es tan inagotable como el átomo, la naturaleza es infinita, pero existe infinitamente, y este reconocimiento —que es el único categórico, el único incondicional— de su existencia fuera de la conciencia y de las sensaciones del hombre es precisamente lo que distingue el materialismo dialéctico del agnosticismo relativista y del idealismo». Casi nada. El lector puede sonreír, pero se le puede helar la sonrisa si considera que, aunque con muchos matices, el materialismo dialéctico era el sustento último del comunismo, el agnosticismo relativista el de la democracia llamada entonces burguesa (con el cáncer fascista anidado en sus entrañas), y el idealismo de la religión. Más que para tomárselo a broma, lo que deparaba en adelante el siglo xx es para echarse a temblar. Y el pobre electrón por ahí en medio, entre unos y otros. Por eso puede ser conveniente que el lector adquiera cultura científica en libritos de divulgación como éste, escritos por tipos como yo, es decir, científicos profesionales de escasas ínfulas filosóficas y menos políticas. Los conocimientos así adquiridos pueden ayudarle a formarse su propio criterio y dificultar que lo líen. Al menos ésa es mi esperanza.

Una pregunta sutil que se hizo entonces y cuya respuesta se intuía que tendría tremendas consecuencias fue la siguiente: ¿eran idénticos todos los electrones? Si era así, la electricidad podría estar cuantificada, es decir que, como el dinero, toda cantidad de carga eléctrica debería ser un múltiplo de la unidad mínima y fundamental. ¿Cuál era el céntimo de euro de la electricidad? ¿Cuál era la unidad de carga eléctrica? En definitiva, ¿cuál era la carga del electrón? Estas preguntas se podían responder en plan Lenin y todos los filósofos a los que criticaba, o sea, especulando, o midiendo en el laboratorio como nos había enseñado Galileo. Y ahora, de la vieja y todavía entonces ordenada Europa, tenemos que pasar a los jóvenes y aún embarullados Estados Unidos.

Robert Andrews Millikan fue el científico norteamericano más famoso de las dos primeras décadas del siglo xx y el segundo al que con-

cedieron el premio Nobel de Física; en concreto, en 1923 por sus estudios sobre la carga eléctrica elemental y el efecto fotoeléctrico.

Millikan era norteamericano hasta los tuétanos, porque descendía directamente de los pioneros, o sea, de los escoceses e irlandeses que llegaron al Medio Oeste antes de 1750. Sus padres, un predicador y una maestra, tuvieron cuatro niños y tres niñas, siendo Robert el segundo de tal prole. Aunque los chavales iban a la escuela y después al instituto, sus padres hacían que trabajasen duramente, y no sólo ayudando en la granja donde vivían. Robert, sin ir más lejos, trabajó hasta los catorce años diez horas diarias durante los veranos en la tonelería local por jornales de un dólar. Se puso tan fuerte que pronto destacó en varios deportes. Primero estudió en Iowa, donde vivía su familia, y después en Ohio, en un instituto y una universidad que no gozaban de un gran prestigio.

El joven Millikan era aficionado al griego, al tenis y un poco a las matemáticas. Para completar semestres, se le ocurrió matricularse en un curso de física de tres meses. No se enteró de mucho y lo consideró una pérdida de tiempo. Cuando terminó la universidad en 1891, el primer empleo que le ofrecieron fue, precisamente, como profesor de física elemental en un instituto. Aunque lo que él quería era dar clases de deporte, aceptó porque estaba sin un centavo, y aquello marcó su vida de tal manera que durante mucho tiempo hablaba de sí mismo como profesor de física general.

En cuanto ahorró algún dinero, se matriculó en la Universidad de Columbia y obtuvo un máster en física en 1893. La física era tan poco popular allí que Millikan era el único graduado de esa rama. Hizo el doctorado en dos años estudiando la polarización de la luz emitida por superficies metálicas incandescentes, en particular de oro y plata que le proporcionaban en la ceca nacional. La Casa de la Moneda le atraía seguramente por sus connotaciones newtonianas, pero más adelante se hizo patente que lo que le atraía de verdad era la moneda en sí, o sea, hacer fortuna.

Los profesores de Columbia, viendo que el joven físico podía valer para aquello y dado que allí no había nadie que supiera física de ver-

dad, lo convencieron para que se fuera un tiempo a Europa, en concreto a Berlín y Gotinga, que eran las auténticas catedrales de esa ciencia. En realidad, por aquella época casi todos los posgraduados en ciencias de Estados Unidos pasaban un año o dos en Europa para especializarse, tendencia que se invirtió sesenta o setenta años después.

En Alemania, Millikan se relacionó con más estudiantes norteamericanos que alemanes, sobre todo porque no sabía nada de alemán y, aunque intentó aprenderlo, nunca lo habló bien.

Cuando Millikan regresó a Estados Unidos le ofrecieron un puesto en la Universidad de Chicago bajo la dirección del insigne Albert Michelson. Éste se hizo famoso porque demostró experimentalmente que el éter no existía y que la velocidad de la luz en el vacío es constante. Esta demostración sirvió de base a la teoría de la relatividad especial que Einstein formuló pocos años después. A pesar de lo dicho sobre la afición al dinero de Millikan, ésta no se manifestó hasta mucho después, porque el trabajo con Michelson le reportaba un salario que era la mitad del que muy pronto le ofrecerían en otros dos sitios.

Michelson ofreció a Millikan dedicar la mitad de su tiempo a sus propias investigaciones, lo cual era mucho, ya que a casi todos sus colegas les exigía jornada completa enseñando y si querían investigar lo tenían que hacer en su tiempo libre. A pesar de ello, Millikan se dedicó en cuerpo y alma a la enseñanza. Sus clases eran realmente magistrales y divertidas, de manera que tenía mucho éxito entre los estudiantes. Quizá por eso se puso a escribir libros (casi siempre en colaboración con otros compañeros) de física elemental. De hecho, varias generaciones de estudiantes de física de Estados Unidos estudiaron en los libros de Millikan.

Pasó el tiempo y el joven y dinámico profesor empezó a dejar de serlo, porque cumplió los treinta y ocho años y aún no tenía un puesto digno y permanente. La edad media para llegar entonces a catedrático era de treinta y dos años, y él no era ni siquiera profesor titular. Además, para llegar a catedrático había que demostrar que se había hecho investigación relevante, y Millikan, entre tanta clase y tanto libro, había llevado a cabo pocas investigaciones, y ninguna importante.

Estamos ya en 1906, y Max Planck había puesto la primera y firme piedra de la física cuántica, Thomson había descubierto el electrón y Einstein había publicado su teoría de la relatividad y (lo que iba a ser más importante para Millikan) había interpretado el efecto fotoeléctrico dotando a la luz un carácter corpuscular. Pero ¿no habíamos quedado de una vez por todas en que la luz era de naturaleza ondulatoria? Tranquilícese el lector (o lo contrario), porque de esto hablaremos en este capítulo y en los que quedan.

Robert Millikan, ya con cuarenta años, casi sufre un ataque de ansiedad al considerar que se estaba quedando al margen de las revoluciones científicas en ciernes, y eso, a un tipo ambicioso y autosuficiente como era él, podía llevarle al desastre. Los estudiantes le querían y sus compañeros de la Universidad de Chicago apreciaban sus dotes pedagógicas, pero él veía cómo otros científicos mucho más jóvenes alcanzaban resultados que les proporcionaban fama y honores mientras él se quedaba en maestro de escuela cualificado. Dejó de escribir libros, se fue a la biblioteca y allí trató de dilucidar qué le podía hacer famoso, o por lo menos catedrático, de golpe y porrazo. Con cuarenta y dos años se decidió: mediría la carga del electrón.

Desde los experimentos con rayos catódicos de los alemanes y otros, así como con los rayos X de Roentgen, se sabía que éstos ionizaban a su paso las moléculas de aire y vapor de agua, es decir, que las cargaban eléctricamente. La primera idea notable de Millikan fue someter estas moléculas agregadas en gotitas de agua, a modo de niebla, a un campo eléctrico. A las gotitas se adherían los electrones del aire liberados por los rayos X, cargándose cada una de manera distinta. Piense el lector que una gotita de agua, por pequeña que sea, está formada por miles de billones de moléculas. De todas ellas, los rayos X electrizarán a un número determinado (y pequeño) y la gotita en su conjunto adquirirá una carga eléctrica múltiplo de la carga del electrón. Sometidas las gotas a un campo eléctrico, se verán atraídas por el electrodo positivo y repelidas por el negativo, porque experimentarán una fuerza proporcional a la intensidad del campo eléctrico multiplicada por la carga eléctrica. Otra fuerza que actuará sobre la gotita de agua será la de la gravedad, o sea, su peso.

Millikan pensaba que las dos fuerzas se podían contrarrestar y que la gotita se podía mantener suspendida. Digámoslo de forma un poco más cuantitativa. La primera fuerza se expresa como $q \times E$, siendo q la carga desconocida de la gotita y E el campo eléctrico, cuyo valor conoceremos por el conjunto de baterías que hayamos colocado para suministrarlo. La fuerza de la gravedad, o peso, es simplemente $m \times g$, siendo m la masa de la gotita y g la aceleración de la gravedad, que vale $9,8 \text{ m/s}^2$. Puesto que la gota no cae libremente sino en un medio (aire más niebla de gotitas), a la fuerza de la gravedad hay que restarle la que provoca la viscosidad de dicho medio. El lector ya estará liado, pero la cosa es muy fácil. Piense en una gotita de agua que cae del techo al suelo de su habitación. Caer por su propio peso ($m \times g$), pero, si se quiere ser riguroso, a esa fuerza hay que restarle el rozamiento de la gota con las moléculas de aire con que se encuentra (como en el caso de la caída de un paracaidista, cuyo peso, por fortuna, se ve en gran medida contrarrestado por el rozamiento del paracaidista con el aire). Ahora supongamos que tanto el techo como el suelo son metálicos, y que los conectamos a los polos de una batería de manera que el techo sea el positivo y el suelo el negativo. Nos fijamos en una gota concreta que sabemos que está cargada negativamente de la manera que pronto veremos. Se verá atraída hacia el suelo por su peso, restándole el rozamiento, y hacia el techo por la fuerza $q \times E$ del campo eléctrico establecido. (Cargas de distinto signo se atraen.) Si variamos sutilmente el campo eléctrico E de la batería de manera que las tres fuerzas se equilibren, conseguiremos que la gotita se quede flotando.

Tenemos dos incógnitas: la fuerza de rozamiento y la carga q . Podemos averiguar la primera observando muchísimas gotitas cayendo antes de conectar la batería. Incluso, como hacía Millikan, observando cómo subían y bajaban al variar el campo eléctrico. Medía con un cronómetro la velocidad con lo que lo hacían. Así sólo le quedaba como incógnita la carga eléctrica q de cada gotita. Tenían que ser múltiplos de la carga eléctrica del electrón, pero aquello no acababa de dar los resultados apetecidos.

Entonces tuvo la segunda idea notable, que junto con la primera, la de equilibrar gotitas cargadas, hicieron genial el experimento. Lo que le fallaba era que las gotas de agua se evaporaban por una parte y se hacían más gruesas por otra al unirse a las que se encontraba en su recorrido, como hacen las gotas de lluvia al caer desde las nubes. Se le ocurrió utilizar gotas de aceite, que no presentaban ese inconveniente. La manera de obtener gotitas de aceite fue también muy original: con un vaporizador de perfume al que, exageradamente, llaman atomizador (véase la figura 8.6).

Ya estamos en condiciones de describir el experimento de Millikan tal como él lo llevó a cabo y como se hace en los laboratorios de enseñanza de muchas facultades de física.

Consiste en una cámara cerrada a la que se le ajustan dos placas horizontales metálicas conectadas a un conjunto de baterías cuyo voltaje se puede regular. En la parte superior está el pulverizador de gotitas de aceite. La inferior tiene tres ventanas por las que entran los rayos X que cargarán las gotitas, una fuente de luz que iluminará las gotas y, a un ángulo apropiado, un visor a modo de telescopio. Es lícito llamarlo así porque, en efecto, las gotas de aceite iluminadas se ven como estrellas brillantes sobre un fondo opaco. Animaría al lector a realizar este experimento, pero el inconveniente es la fuente de rayos X, que, aunque no es demasiado complicada de fabricar (puede valer el tubo de imagen de un televisor viejo con su circuito de alta tensión, aunque hay que manipularlo y después hacer el vacío), es peligroso exponerse a las consecuencias del invento, tanto por el alto voltaje que genera (decenas de miles de voltios) como por los efectos nocivos de los propios rayos X.

El experimento comienza sin conectar las baterías, sino sólo observando y midiendo con un cronómetro la caída de las gotitas de aceite por su propio peso contrarrestado en parte por la viscosidad del medio. Una vez que ya sabemos cómo caen, ionizamos el interior de la cámara lanzándole rayos X, conectamos la batería y graduamos el campo eléctrico con un cuidado exquisito (Millikan utilizaba un cuchillo afilado recorriendo los finos hilos de cobre de una bobina). A la vez, observamos por el visor hasta ver una gotita flotando. Apuntamos el campo eléctrico que hace que la gota se quede inmóvil. Lo repeti-

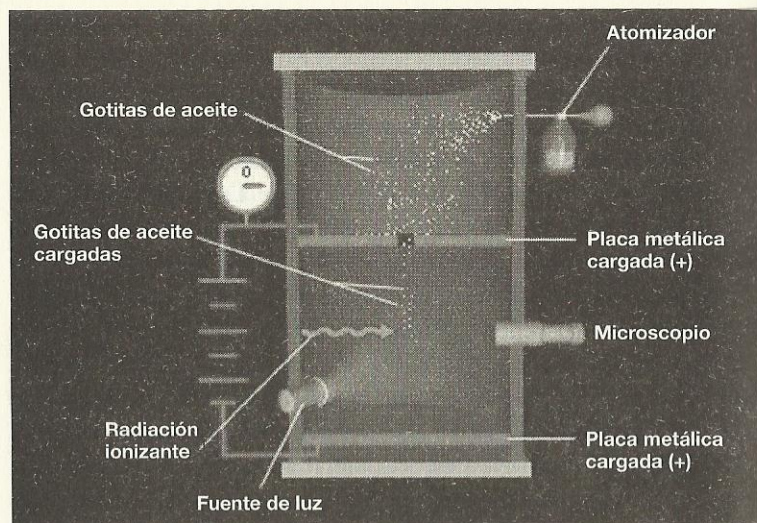


Figura 8.6. Esquema del aparato empleado por Millikan para determinar la carga eléctrica fundamental.

mos cuantas más veces mejor. Lo apagamos todo y nos enfrascamos en nuestras notas. Si hemos sido tan rigurosos como Millikan, concluiremos que todas las gotas flotantes tenían una carga eléctrica múltiplo de un número muy pequeño, $1,6 \times 10^{-19}$ (cero coma dieciocho ceros seguidos de 16) culombios, que es la unidad apropiada de carga eléctrica. Los estudiantes de física obtienen entre 2 y 3×10^{-19} , y el valor actual es $1,60217733 \times 10^{-19}$.

En cuanto Millikan publicó sus resultados en 1910, lo hicieron catedrático y, además, le concedieron el premio Nobel. Fue por una combinación de seguridad en sí mismo y terquedad junto con una finura experimental impecable (véase la figura 8.7).

Todos estamos familiarizados con las células fotoeléctricas porque nos las encontramos en las puertas de los ascensores, los cuartos de baño públicos, algunas calculadoras de bolsillo, etc. Consisten en un haz

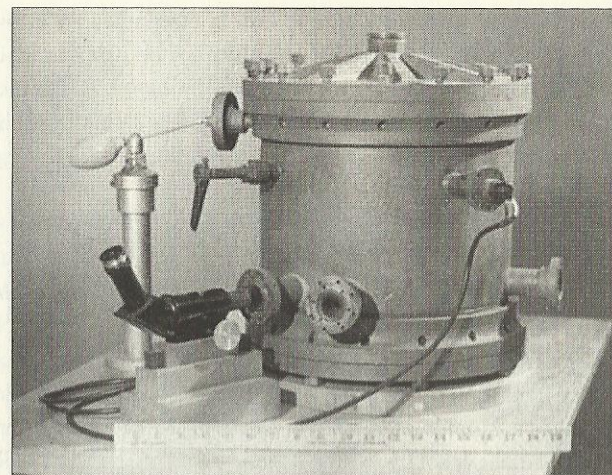


Figura 8.7. El aparato real utilizado por Millikan.

de luz, normalmente no visible, que incide en una chapita metálica. La luz arranca electrones a la chapita, y a éstos se los hace fluir en un circuito electrónico. El sistema está estacionario; cuando se corta la luz porque la intercepta un cuerpo, por ejemplo el de una persona, todo se altera y se dispara una alarma que activa una cisterna, interrumpe el cierre de una puerta, etc. En la calculadora, en los paneles de los artefactos espaciales y en general en las células fotovoltaicas, el efecto fotoeléctrico se aprovecha (así se llama la emisión de electrones de la chapa por la luz) convirtiendo directamente la luz (radiación solar) en electricidad. Este efecto, tan familiar y cotidiano hoy día, representó una conmoción en la física cuando se descubrió, hace un siglo.

Max Planck, cuya grandeza en la física es comparable en magnitud a la tragedia de la última etapa de su vida (por ejemplo, los nazis le ofrecieron la vida de su hijo, condenado a muerte por haber participado en el intento de asesinato de Hitler, a cambio de que se uniera al partido; Planck rehusó y a su hijo lo fusilaron), había hecho el descubrimiento del siglo en el año 1900. Concluyó que la energía estaba tan

cuantificada como hemos visto que lo está la electricidad y el dinero. O sea, que la energía se intercambia en múltiplos de una cantidad mínima. En el caso de la radiación, esa energía mínima era proporcional a su frecuencia. A la constante de proporcionalidad se le llamó «constante de Planck» y se representa como h . Es decir, el cuanto de energía de radiación tiene una energía $E = h \times \nu$.

Los experimentos del efecto fotoeléctrico daban unos resultados que no se podían explicar con la física de entonces, que hoy llamamos clásica. Fue Einstein el que lo explicó de una manera sencilla, dotando a la luz de carácter corpuscular: la luz era un chorro de partículas que pronto se llamaron «fotones» y cada una de las cuales transportaba una cantidad de energía que era precisamente la postulada por Planck: $E = h \times \nu$. Aquello era resucitar la idea de Newton de la luz pero con base experimental, contradiciendo todos los resultados que atribuían a la luz un carácter indudablemente ondulatorio. ¿Cómo podía ser?

Un tipo tan conservador como Millikan (y tampoco otros, como el propio Planck) no podía aceptar tal desbarajuste. Se puso a tratar de enmendarle la plana al propio Einstein de la manera que él lo sabía hacer: midiendo y requetemiendo el efecto fotoeléctrico a la vez que calculaba la constante de Planck. Durante diez años, y con gran publicidad, se empeñó en refutar el concepto de fotón, pero al final tuvo que aceptar que sus propios resultados experimentales confirmaban exactamente la hipótesis de Einstein y la proporcionalidad de Planck.

Pero Millikan era tan buen experimentador como cabezota, y siguió erre que erre diciendo que confirmar una hipótesis no significaba que hubiera que aceptarla como mecanismo de la naturaleza «porque le falta una base teórica satisfactoria». Hay que ser audaz para decirle eso a Einstein. Pero los físicos de la Academia sueca sí que sabían de qué iba el asunto, y le dieron el premio Nobel a Einstein precisamente por su interpretación del efecto fotoeléctrico, no por la teoría de la relatividad, que aún no tenía confirmación experimental; a Planck también se lo concedieron por su concepto de cuanto. Y a Millikan se lo otorgaron por su medición de la unidad de carga eléctrica y la confirmación experimental del efecto fotoeléctrico con la medida de la cons-

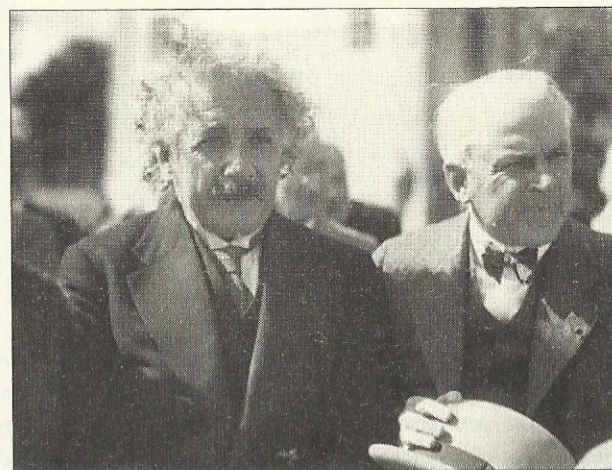


Figura 8.8. Millikan y Einstein.

tante de Planck. Sin embargo, debido a la oposición de Millikan, los trabajos de Einstein y de Planck en este campo fueron ignorados por completo durante los diez años que el norteamericano tardó en convencer al mundo, que no a sí mismo, de lo acertados que eran.

En cualquier caso, hay que admirar la capacidad de Millikan para identificar los asuntos clave del momento en física, su persistencia y, sobre todo, su pasión por obtener resultados experimentales de la máxima precisión.

A partir de entonces, Millikan empezó a ocupar cargos oficiales en Washington, en la Academia Nacional de Ciencias y en el Consejo de Investigación Nacional, aunque continuó con sus investigaciones, pero más como director de equipos que individualmente. Por ejemplo, durante la guerra se encargó de la detección de submarinos. En tiempos de paz se dedicó a organizar la ciencia en su país, a ganar dinero y a tratar de reconciliar la ciencia con la religión. En lo que tuvo más éxito fue en lo segundo. Murió, con todos los honores, a los ochenta y cinco años, es decir, en 1953.

Rutherford El núcleo atómico

La historia de la ciencia, como la de cualquier actividad humana decisiva para el devenir histórico, está jalonada por nombres de personas singulares tras las cuales hay miríadas de otras que, sin ser tan decisivas ni famosas, permitieron que aquéllas llegaran a las cimas que alcanzaron. Newton resumió muy bien este proceso al decir que había llegado tan alto por haberse subido a hombros de gigantes. Más que gigantes, cada figura excelsa en ciencia se ha subido a una sólida pirámide formada por infinidad de otros científicos. Ernest Rutherford fue una de estas figuras singulares, pero con una característica que lo hizo más original: creó muchas otras pirámides. Quiero decir con esto que formó a otros físicos que alcanzaron cotas increíbles. Cuando un científico desarrolla su investigación en la universidad, una de sus obligaciones es dirigir tesis doctorales de jóvenes posgraduados. Nada hay más satisfactorio en la carrera académica que ver cómo nuestros discípulos consiguen éxitos científicos y honores universitarios. Nuestro orgullo se dispara cuando alguno de ellos alcanza la posición de catedrático. Pues bien, un montón de físicos jóvenes que aprendieron con Rutherford recibieron nada menos que el premio Nobel de Física. Naturalmente, a él también le concedieron tan magna distinción, pero de química, no de física, lo cual le contrarió bastante porque consideraba la química un punto menos importante que la física, pero sólo se permitió comentar: «He cambiado muchas veces en mi vida, pero nunca de manera tan brusca como en esta metamorfosis de físico a químico».

Para situar en su contexto histórico el experimento que vamos a describir en este capítulo, piense el lector que a finales del siglo XIX (como ocurre de nuevo hoy día) se consideraba que la física había alcanzado sus límites. Sólo restaba simplificar sus formulaciones con objetivos pedagógicos y calcular más cifras decimales a los resultados importantes. De hecho, en muchas facultades de ciencias los estudiantes más brillantes empezaban (exactamente igual que ahora) a desertar de la física porque pensaban que no quedaba ningún descubrimiento glorioso por hacer. El electromagnetismo, la termodinámica, la óptica, la mecánica, etc., habían entrado ya en la fase de la ingeniería, por lo que sólo quedaba la tarea de ampliar sus aplicaciones. Dos físicos importantes cuyos nombres no recuerdo con certeza, resumieron el debate de una manera deliciosa. Uno le escribió al otro diciendo que lo único que quedaba pendiente en física era refinar detalles. La carta de respuesta de su amigo mostraba un marco que encuadraba un tosco monigote. Debajo, escribía lacónicamente: «Salvo detalles refinados, pinto como Tiziano».

En la década de 1895 a 1905, aproximadamente, se descubrieron el electrón y la radiactividad, poniendo en evidencia la divisibilidad del átomo, se formuló la teoría de la relatividad, se pusieron los fundamentos de la mecánica cuántica y tuvieron lugar otras muchas convulsiones tan intensas que el siglo XX estuvo en gran medida condicionado por ellas. Piense el lector solamente en la bomba atómica y el transistor.

Justo al principio de aquella década prodigiosa, en 1895, el joven Ernest Rutherford llegó a uno de los muchos centros punteros de Europa en física: el laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, donde J.J. Thomson hacía sus experimentos con los rayos catódicos. ¿Quién era y cómo había llegado hasta allí aquel exótico personaje desde el otro lado del mundo? ¿Cómo podía competir con los selectos estudiantes de Cambridge un joven formado en alguna universidad de Nueva Zelanda?

Efectivamente, el College Canterbury donde Rutherford había estudiado no era comparable a Cambridge pero, cualquiera que fuese su nivel pedagógico, él había alcanzado las máximas notas en materias tan variadas como matemáticas, latín, francés y física, aparte de haber sido

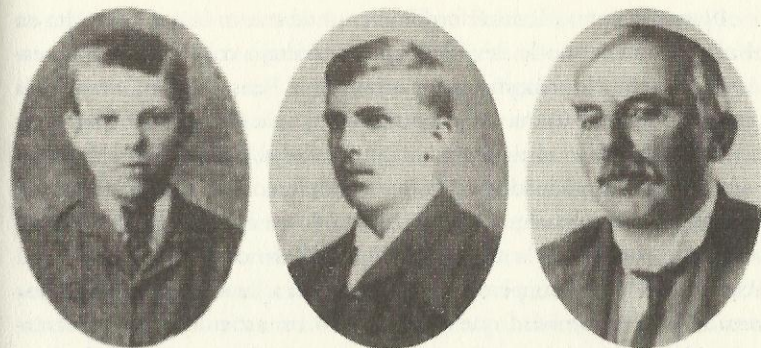


Figura 9.1. Rutherford en tres etapas de su vida.

miembro destacado de la Sociedad Dialéctica (un club estudiantil de debates) y del equipo de rugby. Además, y quizá lo más importante, se había relacionado con dos librepensadores que le influyeron notablemente: Alexander Bickerton, un liberal radical, y Mary Newton, una bella y joven viuda que lideró el movimiento sufragista que dos años antes había conseguido que Nueva Zelanda fuera el primer país democrático donde las mujeres conquistaron el derecho al voto.

Gracias a sus buenas notas en matemáticas y física, Rutherford consiguió una beca (la única que daban cada año en su universidad) para hacer un máster. Duraba sólo un año y exigía que se llevase a cabo un trabajo de investigación. El joven Rutherford eligió profundizar en una práctica de laboratorio de un curso elemental: averiguar si el hierro se imantaba con corrientes magnetizadoras de frecuencia muy alta, algo que ya estaba haciendo de manera magistral Nikola Tesla para transmitir potencia sin alambres. Rutherford desarrolló dos aparatos: un mecanismo para conectar dos circuitos eléctricos en un intervalo ajustable de hasta cien milésimas de segundo y un detector magnético de pulsos de corriente muy seguidos. Así, sin más, había inventado la base de la telegrafía sin hilos, que otros, como Hertz, Tesla o Marconi, desarrollaron admirablemente.

Naturalmente, a Rutherford le dieron de nuevo la nota más alta en el máster, lo cual no le llevó a encontrar trabajo como maestro de escuela, que era a lo máximo que podía aspirar. Pensó —en un viraje en la dirección opuesta al que hizo Foucault—, en hacerse médico, pero una circunstancia evitó el desaguisado. Su Graciosa Majestad ofrecía becas cada dos años a graduados del Imperio británico para que desarrollaran investigaciones en cualquier parte del mundo en campos de utilidad para su propio país, o sea, la colonia. A Nueva Zelanda le tocaba sólo una. Rutherford la solicitó, pero se la concedieron a James McLaurin, un joven de otra universidad que había escrito un artículo sobre un tratamiento químico del oro. Por primera vez en su vida, Rutherford no fue el primero en algo. Pero McLaurin renunció para casarse, y el segundo en la lista (de sólo dos) era Rutherford.

El inefable profesor Thomson accedió a hacerse cargo del neozelandés y lo puso a trabajar en lo que le había dicho que sabía hacer: detectar corrientes eléctricas de alta frecuencia y usar el detector para medir propiedades de aisladores. Consiguió detectar ondas electromagnéticas generadas por un oscilador situado a varios metros de distancia incluso cuando entre el emisor y el receptor se interponía un muro de hormigón. Un colega de Thomson, sir Robert Ball, más amante de la fama y el dinero que de la ciencia pura, le propuso aumentar la sensibilidad de los dos circuitos para resolver el problema de que los barcos no pudieran detectar las luces en la niebla. Rutherford consiguió detectar ondas electromagnéticas emitidas a una distancia de cuatrocientos metros. Thomson, para felicidad de Giuliano Marconi y de todos los físicos nucleares del siglo xx, convenció a Rutherford de que dejase de estudiar aplicaciones y dedicase sus habilidades a cosas más profundas. Para empezar, debía estudiar la conducción eléctrica de los gases. Recuérdese que Thomson había conseguido demostrar la existencia del electrón haciendo el máximo vacío en los tubos de rayos catódicos y sometiendo el gas de su interior, que enrarecido se transformaba en conductor, a altos voltajes. Las técnicas que inventó Rutherford para medir la conductividad de los gases entusiasmaron a su preceptor, pero en cuanto tuvo noticias del descubrimiento, unos meses antes, de los

rayos X, se dedicó a estudiarlos por libre. Rutherford también quedó encandilado con el recientísimo descubrimiento de la radiactividad. En este punto, el lector me va a permitir una digresión que, además de ilustrativa, considerará aleccionadora en varios aspectos.

Desde hacía infinidad de tiempo, los geólogos, físicos y químicos conocían ciertos fascinantes fenómenos naturales llamados «luminiscencias». Había dos clases de minerales (incluso sustancias orgánicas) luminiscentes: las fluorescentes, que emitían una extraña luz azulada al ser estimuladas por radiación externa, y las fosforescentes, cuya emisión verdosa persistía aun cuando se las dejaba de iluminar. Obviamente, la presencia de átomos de flúor y fósforo en esas sustancias era decisiva, pero no era condición necesaria ni suficiente. Por ejemplo, se sabía desde su descubrimiento, un siglo antes, que algunas sales de uranio eran fosforescentes y otras no. El uranio había sido descubierto por un químico alemán el mismo año de la Revolución francesa, 1789, al estudiar unas pechblendas de Sajonia. Al nuevo elemento le llamaron «uranio» porque el descubrimiento de moda entonces era el planeta Urano, tradición que continuó después con los elementos neptunio y plutonio.

Una ilustre saga de físicos franceses, los Becquerel, llevaba tres generaciones experimentando con sustancias fosforescentes. Abuelo, hijos y nietos pertenecieron a la Academia de Ciencias, y en sus reuniones de los lunes presentaban con frecuencia sus resultados sobre el fenómeno. Las sales de uranio, y el uranio en sí, apenas habían encontrado aplicaciones industriales más que para colorear vidrios y cosas igual de irrelevantes. Sin embargo, en el laboratorio de los Becquerel siempre había sales de uranio por sus propiedades fosforescentes.

Por otro lado, la fotografía en la segunda mitad del siglo xix sí que era muy popular, y no había laboratorio de física o química en que no se experimentara con emulsiones y procesos fotográficos. La obsesión de Becquerel nieto, Henri, era fotografiar con la luz fosforescente. Recuérdese que la fosforescencia tenía que ser estimulada por luz normal. Cuando se descubrieron los rayos X, que se hicieron aún más populares que la fotografía por razones médicas obvias, Becquerel pensaba que los efectos de la fosforescencia quizá fueran parecidos o más útiles que

los de los misteriosos rayos X, así que se dedicó a impresionar monedas, tijeras, etc. en placas fotográficas con sales de uranio. Como la gran virtud de los rayos X era su penetrabilidad en ciertas sustancias como la piel, los tejidos, las hojas de aluminio, el papel y demás, Becquerel se aplicó en averiguar la capacidad que para ello tenían los rayos fosforescentes. Obtuvo resultados bastante más pobres que con los rayos X, pero Becquerel insistió. El procedimiento que usaba es fácil de entender. Cubría una placa fotográfica con papel negro de manera que no la impresionara la luz del Sol. Sobre ella ponía, por ejemplo, una moneda. Lo cubría todo con sal de uranio y lo exponía al Sol intenso. Esta luz excitaba la fosforescencia de la sal. Revelaba la placa, y la imagen era debida sólo a la luz fosforescente.

Los libros que no se ocupan mucho de la historia de la física y la química, por ejemplo los textos de física y química, dicen que Becquerel descubrió la radiactividad por casualidad, o sea, porque los días finales de febrero y los primeros de marzo de 1896 estuvieron completamente nublados en París. Lo que ocurrió fue que Becquerel estaba impaciente por exponer al Sol radiante una placa dispuesta como hemos indicado porque tenía que dar una charla más en la Academia y, tras tantos días nublados, se desesperó y pensó que de todas formas revelaría la placa para hablar de los efectos de la fosforescencia débil. Resultó que la imagen de la moneda que había interpuesto entre la placa y las sales de uranio salía tan nítida como si éstas hubieran estado excitadas por luz intensa. La charla despertó más aburrimiento que otra cosa, pero Becquerel estaba muy impresionado.

Repetió aquello mil veces, dejando ya todo a oscuras en el fondo de un cajón, y dedujo que las sales emitían rayos que no tenían nada que ver con la fosforescencia. Entre otras cosas porque las sales de uranio, no fosforescentes también impresionaban las placas. Después le hizo de todo a las dichas sales, las calentó, las separó químicamente, etc., y concluyó que era sólo el uranio el que emitía algún tipo de radiación nueva. Que después de tres generaciones trabajando en un asunto se desemboque en un hallazgo importante y se diga que fue fruto de la casualidad es un poco injusto.

De una manera más sistemática (y heroica), e incluso más científica, el matrimonio Joliot y Marie Curie demostraron que muchas sustancias, primero y elementos simples, después, emitían rayos que sólo podían provenir de sus átomos. La radiactividad, como los Curie llamaron al fenómeno, estaba descubierta, aunque se ignorara su naturaleza y procedencia exacta. Pero esta historia es seguramente mejor conocida por el lector.

El corolario de esta digresión está por llegar. Becquerel publicó siete artículos sobre el tema en 1896, dos el año siguiente y ninguno en 1898. La razón la tenemos en la figura 9.2.

La imagen de la izquierda está hecha con emisiones de sustancias radiactivas. La de la derecha, con rayos X. Obviamente, la calidad de esta última es muy superior. Conclusión: la radiactividad no sirve para nada.

Así estaban las cosas cuando Rutherford se interesó por el nuevo fenómeno. Sin hacer caso a las pobres aplicaciones que se entreveían, ante un misterio se trabaja para dilucidarlo y sanseacabó. Éste es el verdadero espíritu de la ciencia. Esta actitud es la que ha provocado casi todas las grandes revoluciones científicas. Hasta que los Curie en París y Rutherford en Cambridge no aclararon qué era la radiactividad, Becquerel no se percató de la importancia de su descubrimiento.

Rutherford continuó estudiando la conductividad eléctrica de los gases, y también descubrió que los elementos radiactivos emitían no una clase de rayos sino dos muy distintas, a las que llamó «alfa» y «beta». Les encontró algunas propiedades, pero no las decisivas, que descubriría unos años más tarde. Aunque, eso sí, dedujo que los rayos beta no eran más que electrones. ¿Cómo y por qué diablos salían de forma espontánea esos electrones del átomo?

Como lamentablemente aún sucede hoy día, muchas universidades dejan escapar a brillantes científicos potenciales de manera gratuita. Rutherford no vislumbraba futuro alguno en la Universidad de Cambridge, así que aceptó un puesto en la universidad canadiense de McGill, en Montreal. La cátedra que le ofrecieron y el laboratorio que se organizaría para desarrollar su labor estaban financiados por sir William Mac-

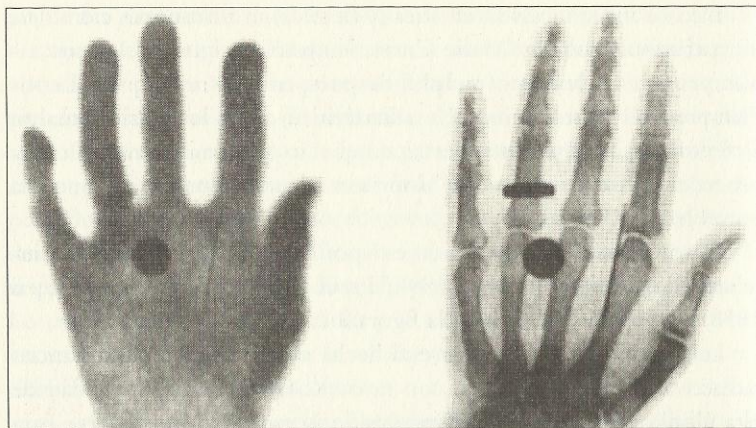


Figura 9.2. Imagen de una mano con anillo y moneda obtenida por una fuente radiactiva y otra de rayos X.

Donald, un millonario comerciante de tabaco para quien fumar era un hábito inundo. El claustro de Cambridge se dio tan pronto cuenta de lo impropio de su política hacia los jóvenes que al año siguiente cambió las normas para que pudieran acceder a plazas estables con más facilidad. Pero Rutherford había visto la posibilidad de atraer a su querida Mary Newton y, sin pensárselo dos veces, en 1900 regresó a Nueva Zelanda para casarse con ella. Por cierto, la mejor fuente biográfica de Rutherford de aquellos años es la gran cantidad de cartas que le escribió a Mary y a su madre, cartas que ambas conservaron. En la que le pedía que se casara con él y se fueran a Canadá, decía: «¡Espero trabajar un montón y formar una escuela de investigación que empañe el brillo de los Yankees!».

Aquel viaje a su tierra natal se convirtió en las primeras vacaciones de Rutherford, por lo que se sintió espléndido y se gastó la friolera de 1.250 dólares, el salario de medio año, entre el viaje, la boda y la luna de miel. La pareja llegó a Montreal en septiembre de 1900.

En McGill, el volcán que Rutherford llevaba dentro entró en erupción. Con veintisiete años, estando su querida y enérgica Mary con él,

con un puesto de trabajo estable aunque no muy bien pagado y en un laboratorio magníficamente equipado, el gigantón neozelandés de voz atronadora y mirada brillante hizo temblar la física. Su mejor colaborador allí, Frederick Soddy, dejó escrito de él: «Rutherford y sus emanaciones radiactivas, así como su inagotable actividad, me tuvo muchas semanas al borde del colapso, y lo abandoné todo para seguirlo. Durante más de dos años, la actividad científica llegó a ser tan febril como sería raro que un individuo desarrollara en toda su vida, raro incluso para la vida media de toda una institución».

Precisamente con este estudiante, Soddy, Rutherford descubrió lo más importante entre la infinidad de cosas (publicó más de setenta artículos) que hizo durante su estancia de nueve años en Canadá: la radiactividad no consistía en otra cosa que en la desintegración espontánea de ciertos átomos pesados. Esta descomposición atómica se manifestaba en tres tipos de emisiones: la alfa, que eran átomos de helio; la beta, que eran electrones, y la gamma, que era radiación electromagnética muy energética, o sea, de altísima frecuencia y, en consecuencia, cortísima longitud de onda. Esto, por supuesto, llamó la atención de todo el mundo científico, razón por la cual le ofrecieron plazas en las mejores universidades, sobre todo de Estados Unidos. Pero los canadienses reaccionaron y le ofrecieron un sueldo mucho mejor, más presupuesto para su laboratorio y becas para jóvenes brillantes.

Rutherford encontró pronto la ley que regía la desintegración atómica, es decir, el ritmo con que los átomos de una muestra radiactiva se desintegraban. La vida media de los átomos radiactivos podía variar desde pocos segundos hasta miles de millones de años, y su ley predecía a la perfección esta inmensa variación. También observó que el uranio y otros elementos radiactivos se iban transformando en otros que a su vez se desintegraban (a ritmo distinto), terminando la cadena invariablemente en plomo. A esto le encontró Rutherford una aplicación magnífica. Examinando muestras geológicas que contuvieran estos elementos así como plomo, puesto que sabía a qué ritmo se desintegraba cada uno, podía establecer un límite inferior a la edad de la Tierra. Este método de datación de muestras antiguas aún se utiliza.

El lema de Rutherford era hacer experimentos con aparatos de la mínima complejidad buscando la máxima precisión y tratando de explicarlos, a su vez, con las matemáticas más sencillas y rigurosas. En numerosas ocasiones dijo que creía en la simplicidad quizá porque él era un hombre simple, y en este sentido acuñó la frase que es célebre entre todos los físicos: «Si le explicas a un camarero lo que estás haciendo y no lo entiende, lo pobre no es el camarero, sino lo que estás haciendo». Esta manera de trabajar, una intuición formidable y una suerte no desdeñable consiguieron resultados variados y decisivos. Un ejemplo quizá no muy relevante pero ilustrativo de todo esto es el siguiente. Estudiando cómo las radiaciones ionizaban (cargaban eléctricamente) los gases, se le ocurrió echar una calada del humo de su cigarrillo en un tubo de medida. Aquello alteraba el resultado, de manera que así, como quien no quiere la cosa, inventó el detector de humos que hoy día sirve de alarma de incendios en casi todos los edificios públicos (véase la figura 9.3).

Rutherford estaba muy a gusto en Canadá, salvo por dos detalles: se sentía muy lejos de los grandes centros europeos de la física y, dado su alto nivel de exigencia, consideraba que los estudiantes canadienses no estaban muy bien formados en promedio. En 1907 sucedió que el profesor Schuster, de la Universidad de Manchester, heredó una descomunal fortuna. No se le ocurrió mejor idea que ofrecerle a Rutherford, de su propio pecunio, una cátedra muy bien pagada y dotada de medios experimentales y humanos. Así se hacían las cosas entonces. Rutherford, para alegría de Mary, a la que los fríos canadienses tenían trastornada, aceptó.

Una anécdota refleja bien la situación de Rutherford al poco tiempo de llegar a Manchester, en 1907. La recoge una de las muchas cartas que le escribió a su madre. «La modestia casi me impide contarte lo siguiente. Ayer visitó nuestro laboratorio el barón Kikuchi, ministro de Educación de Japón. Schuster me lo presentó. Más tarde, el ministro le dijo a Schuster: “Supongo que el Rutherford que usted me ha presentado es el hijo del célebre profesor Rutherford”».

Lo mejor del laboratorio de Rutherford en Manchester fue un joven alemán llamado Hans Geiger. Aquello era lo que él necesitaba: un

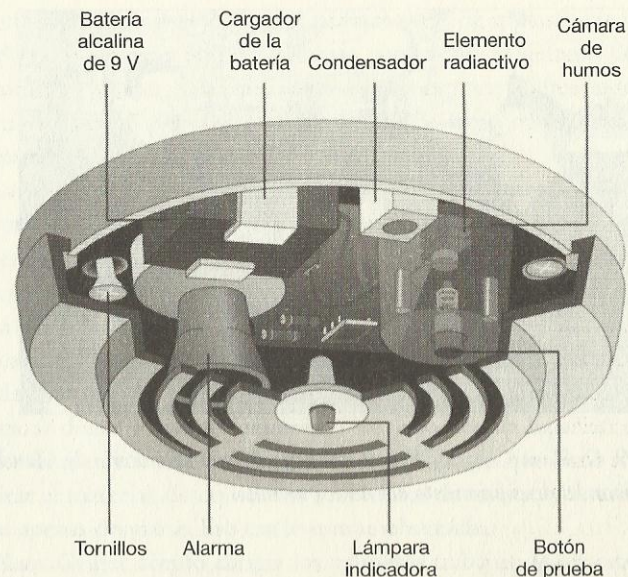


Figura 9.3. Esquema de un detector de incendios moderno.

alemán brillante con una capacidad de trabajo inagotable. De él dejó escrito su jefe: «Hans es un buen hombre que trabaja como un esclavo». Una de las cosas maravillosas que hicieron juntos fue un aparato eléctrico que registraba y contaba las partículas alfa una a una. También averiguaron que estas partículas pesadas producían unos pequeños destellos cuando chocaban con una pantalla de sulfato de zinc. Combinando ambas técnicas, Rutherford y Geiger llegaron a contar el número de partículas alfa que emitía un gramo de radio en un segundo (véase la figura 9.4).

También, con otros aparatos simples, Geiger y Rutherford dedujeron que la partícula alfa portaba una carga eléctrica doble que la del electrón pero positiva. O sea, que eran átomos de helio doblemente ionizados: He^{++} . Con este trabajo, Rutherford se contradijo a sí mismo,

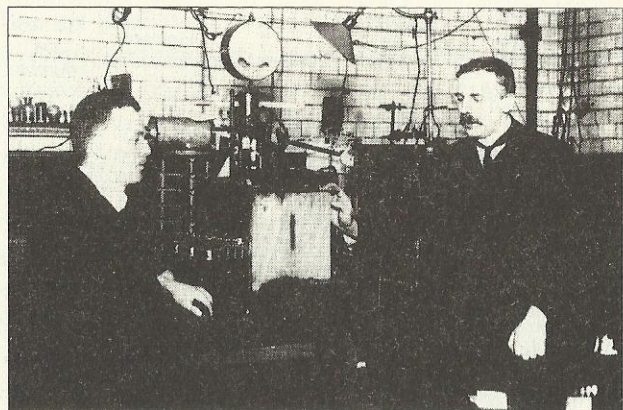


Figura 9.4. Hans Geiger y Ernest Rutherford en el laboratorio de Manchester en la época del descubrimiento del núcleo atómico.

porque le solía decir a sus jóvenes discípulos que «toda ciencia, o es física, o es coleccionismo de sellos». Según estas palabras, detectar y contar alfas individualmente se parecía más al coleccionismo que a la física según él y, para colmo de ironía, ese mismo año, 1908, fue cuando le otorgaron el premio Nobel... de Química, «por sus investigaciones sobre la desintegración de los elementos y la química de las sustancias radiactivas».

Curiosamente, aunque no resulta demasiado extraño en la historia de la física del siglo xx, el descubrimiento más importante de un laureado con el premio Nobel lo hizo después de serle otorgado tal galardón. A finales de 1910, Geiger y Rutherford estaban experimentando con haces de partículas alfa. Estos finos chorros los obtenían sencillamente situando una fuente radiactiva intensa en un contenedor de plomo cerrado pero con una pequeña abertura. A través de ella salían las partículas que después incluso colimaban haciéndolas pasar por un fino canal central practicado en cilindros de plomo alineados. El primer blanco sobre el que hicieron incidir esos haces fue de mica. Como espera-

ban, el haz pasó, impertérrito, por las finas capas de mineral y se fue haciendo cada vez más difuso conforme aumentaba el número de capas de mica que ponían, hasta que llegaban a un espesor en que todas quedaban absorbidas. ¿Por qué pasaban todas las alfas a través de una fina lámina de mica?

La mica, como todo, estaba hecha de átomos, y éstos, según Thomson, eran esponjitas de carga eléctrica positiva con electrones embebidos en ellas compensándolas. Puesto que los átomos en su conjunto eran neutros desde el punto de vista eléctrico, no tenían por qué desviar a las partículas alfa, que eran positivas. Podían chocar como harían dos canicas, pero si se calcula la probabilidad de que colisionaran una alfa del haz con un átomo del blanco teniendo en cuenta el número de ambos, se deducía que era pequeña. Y cuando tuviera lugar un choque tal, la energía de la alfa era tan grande que lo único que haría sería deteriorar el material, descolocando los átomos de su sitio y atravesándolo sin apenas desviarse. Eso era lo que se observaba.

Hans Geiger aceptó dirigir los primeros trabajos de un estudiante llamado Marsden y le pidió a Rutherford una sugerencia para iniciarlo en la investigación. Para sorpresa y casi disgusto del alemán, Rutherford le propuso que Marsden estudiara si los metales, en concreto el platino o el oro, eran capaces de hacer rebotar alguna alfa. ¿Qué chaladura era esa? El platino o el oro, por muy distintos que fueran de la mica, estaban hechos de átomos igual que ésta, y el efecto sobre las alfas no podía diferir apenas. Además, ¿por qué platino u oro, con lo caros que eran? Rutherford se lo explicó jocosamente: las láminas de metal tenían que ser tan finas que sólo los orfebres eran capaces de hacerlas con el oro, o mejor con el platino. Si no fueran tan delgadas como los panes con que esos artesanos recubrían sus manufacturas, las alfas quedarían absorbidas y no se verían ni hacia delante, ni hacia atrás, ni en ningún ángulo.

Geiger, muy escéptico, se lo propuso a Marsden. El dispositivo que inventaron para hacer la observación se muestra en la figura 9.5.

Así, se disponía de una pantalla semicircular de sulfato de zinc situada detrás del blanco de oro sobre el que se disparaba un chorro de partículas alfa. Los destellos a ángulos de más de 90 grados, que era lo

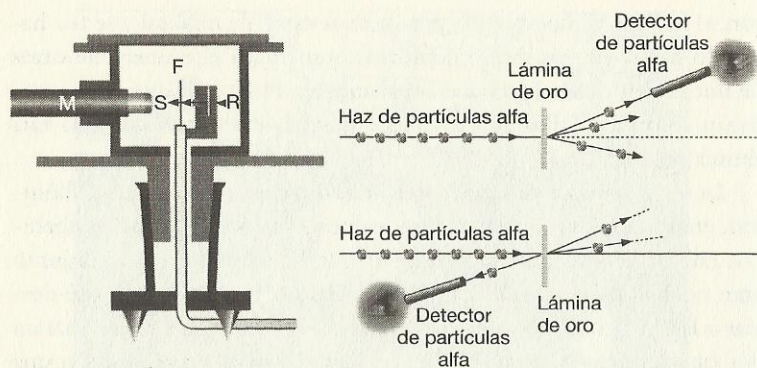


Figura 9.5. Esquema del aparato de Rutherford en que se hacían incidir partículas alfa de una fuente radiactiva sobre una lámina fina de oro. La mayoría la traspasaban sin apenas desviarse, pero una pequeña fracción salían rebotadas a grandes ángulos.

que quería el jefe, o sea, las partículas alfa que de manera literal rebotaban, se observarían con un microscopio. Tras muchas y pacientes horas observando aquello, el resultado era para descolgar la mandíbula: una de cada ocho mil partículas alfa incidentes, aproximadamente, era despedida hacia atrás por el oro. Repitieron la experiencia con un pan de platino, y el resultado fue el mismo. ¿Qué diablos había en los átomos del blanco que provocaba que una partícula alfa de enorme energía saliera rebotada? Cuando se lo dijeron a Rutherford, éste quedó casi tan intrigado como ellos, y dijo su célebre frase: «Es como si se disparara un obús naval de buen calibre sobre una hoja de papel y rebotara».

Ya hemos mencionado que Rutherford, aunque su actividad siempre fuera experimental, era bastante buen matemático. Le propuso a sus colaboradores Geiger y Marsden que calcularan cómo tendrían que ser los átomos de pequeños, compactos y cargados eléctricamente de forma positiva (de otra manera no repelerían a algunas partículas alfa) para que un choque entre el proyectil y el blanco produjera desviaciones tan grandes como las observadas. Él haría lo mismo, y luego cotejarían los

resultados. En pocos días concluyeron que si los átomos tuvieran toda su carga eléctrica positiva y prácticamente toda su masa concentradas en una esferita de diámetro unas diez mil veces menor que el del átomo, pocas alfas chocarían contra ellas, pero las que lo hicieran saldrían despedidas hacia atrás. Habían descubierto el núcleo atómico.

Una de las prácticas con las que más disfrutaban mis alumnos de física cuántica en el laboratorio es el experimento de Rutherford. Una de las lecciones que más me gusta explicar es la deducción de la fórmula de Rutherford para la dispersión de partículas alfa. Los resultados del experimento y los que se obtienen con la fórmula son idénticos.

La imagen del átomo que brindaban el experimento y la fórmula dejó fascinados a Rutherford, Geiger y Marsden, y después al mundo entero. Los átomos de los griegos y los primeros químicos modernos eran tan insospechadamente bellos como sigue. Además de contener electrones, contenían protones en igual número que aquéllos. Éstos, los protones (nuevo bautizo glorioso de Rutherford), tenían exactamente la misma carga eléctrica que los electrones, la elemental calculada por Millikan, pero de carácter positivo. Además, su masa debía ser unas dos mil veces superior a la de los electrones. Los hipotéticos protones se apelotonaban en una minúscula esfera, llamada núcleo atómico, en torno a la cual giraban los livianos electrones. Las proporciones eran como las de una perla (un centímetro de diámetro) y unas órbitas electrónicas que alcanzaban hasta los cien metros (diez mil centímetros, como, digamos, un estadio de fútbol). Así que... ¡los átomos eran como un sistema solar en miniatura! Un átomo no se distinguía de otro más que en el número de protones de su núcleo y de electrones en órbita.

Aquello explicaba a la perfección los resultados del experimento de Geiger y Marsden, pero ¿no abría más incógnitas de las que despejaba? Por supuesto, pero ya hemos visto muchas veces que es justamente esto lo que hace grandioso un hallazgo. Por ejemplo, si cargas eléctricas del mismo signo se repelen, ¿cómo podía mantenerse estable un apelotonamiento tan grande de protones, todos positivos, en un espacio tan minúsculo? Respuesta de Rutherford: porque entre ellos se establece una nueva fuerza de la naturaleza, distinta de las dos conocidas —la gra-

vedad y el electromagnetismo—, mucho más poderosa que esta última y de carácter atractivo. Seguramente, entre los protones haya otras partículas neutras que suministran esta fuerza. Rutherford proponía así la imponente fuerza nuclear y la existencia del neutrón, tal como él bautizó a esa hipotética partícula. Muy pronto se descubrieron los protones y más tarde, en 1932, los neutrones.

Otro problema, este insoslayable, surgió con el modelo planetario de Rutherford. Se sabía desde hacía mucho tiempo que una carga eléctrica acelerada emite radiación electromagnética. Un electrón en su órbita estaría sometido a aceleraciones. Emitiría radiación y, en consecuencia, perdería energía. ¿Cuánto tiempo se mantendría en su órbita antes de caer sobre el núcleo? Fracciones de segundo. Por lo tanto, tal átomo no sería estable. La materia no podría existir si estuviera formada por átomos así.

La solución la aportó Niels Bohr, padre de la física atómica y uno de los estudiosos más influyentes de la mecánica cuántica. Bohr, que fue a Manchester para estudiar con Rutherford, hizo una tesis doctoral teórica en la que, postulando que los electrones no radiaban en sus órbitas e incrustando los nuevos conceptos cuánticos de Planck y otros en la descripción clásica del átomo planetario, demostró que se podían explicar exactamente infinidad de resultados obtenidos de forma empírica por los químicos. Otro discípulo de Rutherford que obtuvo el premio Nobel.

Rutherford, para inmenso orgullo de su madre y diversión suya, fue nombrado sir primero y, años más tarde, nada menos que primer barón Rutherford de Nelson, Nueva Zelanda y Cambridge. Cosas de la monarquía británica.

El año de la concesión de su primer título nobiliario, 1914, se declaró la Primera Guerra Mundial, que pilló a Rutherford camino de su tierra para visitar a su familia. En cuanto regresó a Inglaterra, tres meses después, se puso a trabajar en el desarrollo de métodos para detectar submarinos. Estando en ello, recibió una noticia que marcó su actividad durante la guerra más allá de su trabajo científico: a uno de sus estudiantes más brillantes, Harry Moseley, al que le pronosticaba un seguro pre-

mio Nobel por sus trabajos de aplicación de los rayos X al estudio de la estructura atómica, lo habían matado en Turquía. Rutherford puso todo su empeño en que los países aliados utilizaran a los jóvenes científicos de manera más eficiente en los laboratorios que mandándolos a morir en las trincheras. No le hicieron caso. En el bando alemán también cayeron científicos eminentes como Schwarzschild, el padre de los agujeros negros, y se perdieron infinidad de descubrimientos teóricos y experimentales de igual o mayor relevancia.

En cuanto terminó la guerra, Rutherford volvió a su investigación pacífica y logró una nueva revolución. Según su particular opinión sobre las ciencias, su carrera sufrió una nueva regresión, porque después de habersele hecho pasar de físico a químico, lo habían transformado en alquimista. Continuó con el bombardeo de materiales con partículas alfa, midiendo y contando el resultado de las colisiones de éstas con los núcleos atómicos, y observó que en ciertos casos surgían protones más energéticos que los proyectiles. Otro misterio que se agudizó cuando, con sus colaboradores, tras observar la traza dejada por cuatrocientas mil partículas alfa en una cámara de niebla, descubrió que ocho de ellas se bifurcaban. (Las partículas ionizaban las moléculas, que, una vez cargadas eléctricamente, se convertían en centros de condensación de manera que se hacía visible la trayectoria que habían seguido.) Los nuevos caminos correspondían, uno, al provocado por un simple protón, y el otro a un núcleo completo. Habían descubierto que en esos casos una

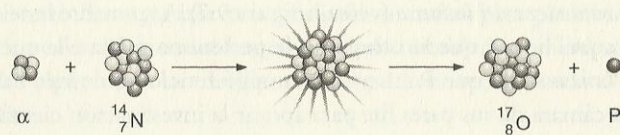


Figura 9.6. Representación de la primera reacción nuclear. Una partícula alfa, núcleo de helio formado por dos protones y dos neutrones, incide sobre un núcleo de nitrógeno de siete protones y otros tantos neutrones. Después de la interacción, el nitrógeno se convierte en un isótopo de oxígeno (ocho protones y nueve neutrones) liberándose el protón restante.

partícula alfa había demolido un núcleo del nitrógeno del aire arrancándole un protón y convirtiéndolo en un núcleo de oxígeno: fue la primera reacción nuclear de la historia y la primera vez que se cumplía el sueño de los alquimistas de transmutar un elemento en otro. Más fama y honores para Rutherford y cualquier estudiante que estuviera cerca de él.

Una nueva visita de seis semanas del eminente profesor Rutherford a Nueva Zelanda se convirtió en el acontecimiento más sonado de aquellas lejanas islas. Las charlas de Rutherford sobre el núcleo atómico se llenaban a rebosar. Alentó a los jóvenes científicos neozelandeses a que ayudaran a los granjeros. Aconsejó a los políticos que crearan un departamento de investigación científica e industrial. En resumen, animó la vida científica y cultural de su país natal.

Sólo una tragedia ensombreció la esplendorosa vida de Rutherford. Su hija única, Eileen, murió a los veintinueve años de edad a causa de una embolia, nueve días después de haber dado luz a su cuarto hijo. Eran las Navidades de 1930. Al regresar a Inglaterra fue cuando lo nombraron barón, y Rutherford eligió para su escudo de armas dos símbolos que le honran: Kiwi, el más grande guerrero maorí, y Hermes Trimegisto, el que era considerado el más grande alquimista de la historia, así como pájaros y animales de la fauna neozelandesa. Además, el escudo se veía cruzado por las curvas de desintegración y crecimiento de la radiactividad. El lema que eligió fue «Primordia Quaerere Rerum», «buscar la naturaleza de las cosas», sacado de la obra de Lucrecio *Sobre la naturaleza del universo* (véase la figura 9.7). A su madre le telegrafió que aquel honor que le otorgaban le pertenecía más a ella que a él. Las dos únicas veces que Rutherford cumplió funciones de lord hablando en la cámara de sus pares fue para apoyar la investigación científica e industrial. Por entonces había vuelto a la Universidad de Cambridge, a su viejo laboratorio Cavendish, donde permanecería hasta su muerte.

Rutherford utilizó su fama científica de la manera más noble, seguramente alentado por su esposa, Mary Newton. Hizo campaña para que en la universidad se garantizaran los mismos derechos a las mujeres que a los hombres; clamó en público por eliminar la censura gubernamental



Figura 9.7. Escudo de armas elegido por Rutherford cuando lo nombraron barón.

en la radio nacional, la BBC; solicitó de manera insistente que se concedieran más becas de investigación a los jóvenes de las colonias; promovió la creación de numerosos centros de investigación y, como antifascista convencido, apoyó a la República española y a todos los científicos alemanes que huían de Hitler. Bueno, no a todos: le negó ayuda al químico Fritz Haber, que había sintetizado varios gases letales usados en la Primera Guerra Mundial. Además, Rutherford fue un pacifista visionario: trató de organizar una campaña mundial para prohibir el uso de aviones en las guerras futuras y, lo más notable, manifestó su temor de que alguna vez la energía nuclear pudiera ser utilizada con fines bélicos.

Rutherford murió prematuramente, a los sesenta y seis años de edad, y sus cenizas fueron depositadas en la abadía de Westminster, cerca de Newton y al lado de Thomson.

Ninguno de sus numerosos y todos afamados discípulos dejaron de aclamarlo con sinceridad, resaltando todos ellos una doble faceta de su carácter: siendo Rutherford un hombre más bien poco modesto y ex-

tremadamente exigente con sus discípulos (los hacía trabajar hasta la extenuación), la mayoría de los descubrimientos que éstos hicieron partieron de sugerencias de su profesor. A pesar de ello, Rutherford se negó a firmar numerosos artículos que anunciaban grandes hallazgos, como el del descubrimiento del núcleo atómico, porque consideró que el mérito era de sus discípulos (en este caso, de Geiger y Marsden). Tampoco firmó el artículo de Chadwick, como él mismo deseaba, del descubrimiento del neutrón que Rutherford había predicho doce años antes. Cockcroft y Wilson, que provocaron las siguientes reacciones nucleares después de la de Rutherford, también trataron de persuadirlo de que firmara el artículo en el que describían la ruptura de núcleos usando aceleradores de partículas, pero Rutherford rehusó amablemente. Y así ocurrió con infinidad de artículos cuyos autores reconocieron que Rutherford los había inspirado con sus intuiciones y consejos. Ésa era la humildad de una persona que no era modesta. Pocos grandes hombres fueron homenajeados tan unánime y sinceramente por tantos grandes hombres. Quizá las palabras más apropiadas que dijeron de él fueron: «No prestaba tanta atención a lo que la naturaleza decía como a lo que susurraba. En este sentido, Rutherford fue un artista». Realmente, no es más fácil realizar un bello experimento que escribir una gran novela, pintar un maravilloso cuadro o componer una sinfonía.

Mary Newton regresó a Nueva Zelanda, donde en 1954 murió apaciblemente, custodiando con inmenso cariño el mayor conjunto de medallas y diplomas jamás otorgados a un científico.

Einstein, Bohr, De Broglie, Heisenberg y otros La rendija doble

Este último capítulo es diferente de los anteriores por dos razones. En primer lugar, el experimento de la rendija doble no se puede atribuir a ningún padre de la mecánica cuántica porque nadie realizó tal experimento. Mejor dicho, no se llevó a cabo hasta 1961, cuando llevaba décadas explicándose en los libros de texto. Así pues, estamos esencialmente ante lo que se llamaba un *gedanken experiment*, o sea, un experimento imaginario. Ésta es la segunda razón de la originalidad del «experimento» de la rendija doble, que su resultado se ha aceptado siempre sin haber sido comprobado en el laboratorio.

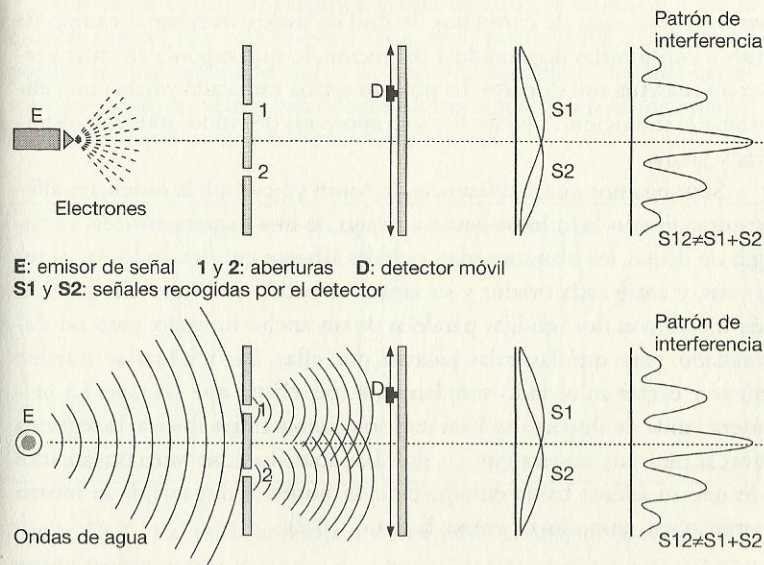
El lector dirá, con razón, que esto parece algo más relacionado con el platonismo y el aristotelismo que con la ciencia y, a la postre, después de haber criticado con saña a los dos ínclitos griegos, resulta que vamos a usar su método de pensamiento. Ni mucho menos, pero así de raro es el experimento más bello de la historia de la física según la encuesta que dio origen a este libro. Los doscientos físicos que respondieron a ella fueron casi unánimes en este sentido. Con razón decía Feynman, un ilustre norteamericano padre de buena parte de la física de posguerra, que todo el misterio de la física cuántica está en el experimento de la rendija doble.

Desde el punto de vista del sentido común, el comportamiento de la naturaleza es absurdo, y nada evidencia más esta insensatez que el experimento que vamos a describir. De hecho, para colmo de peculiaridades, el experimento ya está descrito en el capítulo dedicado a Young sobre la naturaleza ondulatoria de la luz. Recuérdense que se trataba de

hacer pasar luz por una cartulina donde había practicadas dos rendijas y observar en una pantalla situada tras ella el fenómeno de interferencia, que demostraba que la luz se comportaba como una onda. Ahora se trata de repetirlo imaginariamente, por un lado con fotones, los corpúsculos de luz, cuya existencia había demostrado Einstein con su explicación del efecto fotoeléctrico, y, por otro lado, con electrones, cuyo carácter corpuscular estaba fuera de toda duda desde su descubrimiento con los rayos catódicos.

Antes de que el lector se líe demasiado, piense en lo siguiente: ¿qué es un ser humano? Una conjunción de cuerpo y alma, dirían algunos. Pero esto es meterse en filosofía, religión o qué sé yo, y ya he mostrado mi escaso apego a las disquisiciones metafísicas. Digamos que si nos rompemos una pierna nos llevan al traumatólogo, y si tenemos visiones extrañas acudimos al psiquiatra. Estos dos especialistas observan al ser humano de una forma complementaria. Esta complementariedad puede ser nítida en el sentido de que, dejando al margen los aspectos psicósomáticos, o se estudia el cuerpo o se estudia la psique, por más que la conjunción de ambas vertientes sea lo que define al ser humano.

El universo está formado por materia y radiación. La materia está compuesta por átomos, y éstos por partículas más elementales como el protón (o, mejor, los quarks que lo forman), el electrón y muchísimas más cuya descripción va más allá del objetivo de este libro. Todas ellas tienen carácter corpuscular, es decir, se pueden concebir como bolitas más o menos «duras». Ya hemos visto que la radiación, la luz en su forma más familiar, tiene carácter ondulatorio pero también se manifiesta como chorros de fotones, esto es, como corpúsculos. ¿No sería bello que las partículas materiales tuvieran también este carácter dual y se manifestaran como ondas? Tendríamos una simetría maravillosa en los dos componentes de la naturaleza: la luz como onda y como corpúsculo, y lo mismo las partículas. Así pues, insistamos: el experimento de la rendija doble es fundamentalmente el de Young, pero, en lugar de con luz, con electrones, para obtener las mismas figuras de interferencia que ponían de manifiesto el carácter ondulatorio de la luz (véase la figura 10.1).



E: emisor de señal **1 y 2:** aberturas **D:** detector móvil
S1 y S2: señales recogidas por el detector

El detector hace un barrido para registrar la señal que llega a través de las aberturas desde un cañón de electrones (E). S1 corresponde a la señal que pasa cuando 1 está abierta y la 2 está cerrada. S2 corresponde a la señal que pasa cuando 1 está cerrada y 2 está abierta. Cuando ambas están abiertas, la señal resultante no es la suma de S1 y S2. Si el experimento se realiza con ondas, por ejemplo las provocadas por la caída de un objeto al agua, las curvas resultantes son similares a las conseguidas en el experimento con electrones.

Figura 10.1. Dibujo publicado por El País el 23 de octubre de 2002 en el artículo sobre los diez experimentos más bellos de la física.

Pero, como siempre, esto abre más misterios que los que desvela, muchos más. Así pues, dispóngase el lector a despertar sus neuronas y a tener paciencia, y obtendrá como recompensa una nueva visión del mundo. No exagero: vamos a investigar si la existencia del universo es independiente de nosotros o si es sólo una construcción de nuestra mente. Casi nada.

Un día, en pleno servicio militar, el capitán me ordenó la siguiente misión: debía organizar cuatro pelotones de soldados, ir al polvorín a

recoger diez cajas de cartuchos de fusil de asalto, marchar al campo de tiro y consumirlas disparando a discreción, lo que suponía efectuar cerca de cuarenta mil disparos. La pólvora estaba caducada y había que eliminar la munición. Aquello fue una apoteosis de ruido, apuestas, disputas y jarana.

Supongamos que, a diferencia de como yo cumplí la orden, un alférez imaginario la hubiese llevado a cabo de una manera curiosa: en lugar de dianas, los blancos serían grandes sábanas cubriendo los sacos terreros, y entre cada tirador y su sábana se habría colocado una plancha de hierro con dos rendijas paralelas de un ancho holgado, pero no demasiado, para que las balas pasaran por ellas. Las rendijas se pueden abrir y cerrar colocando simplemente una chapa que las tape. La primera tanda de disparos se hará con sólo una rendija abierta, la segunda con la otra y la tercera con las dos. Los soldados, una vez convencidos de que su alférez había enloquecido, se ponen a disparar de la misma guisa, o sea, como locos (véase la figura 10.2).

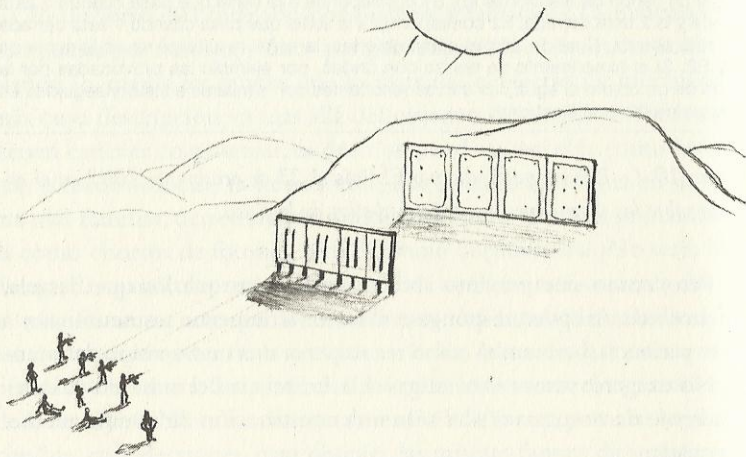


Figura 10.2. Dibujo del ejercicio imaginario de tiro explicativo en el texto.

Tras vaciar el primer cargador, veinte disparos, se disponen a ver lo que ha pasado. Los más torpes le han dado pocos balazos a la sábana porque no han apuntado bien a la única rendija abierta, los más ciertos han colado las veinte balas; todos los impactos, como era de esperar, se alinean más o menos en línea con la rendija.

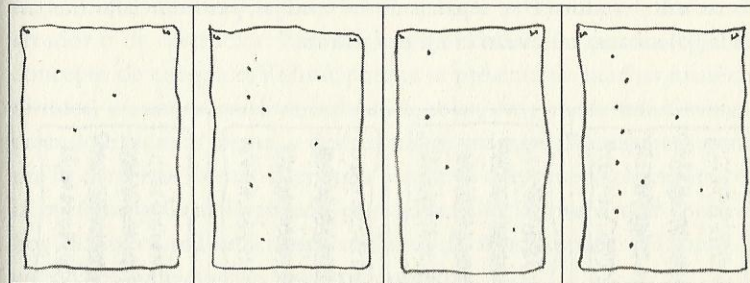


Figura 10.3. Resultado del ejercicio de tiro sobre las sábanas en el caso de la rendija derecha cerrada.

El alférez ordena cerrar esa rendija y abrir la otra. Después de los disparos, el resultado es parecido y los soldados se empiezan a aburrir.

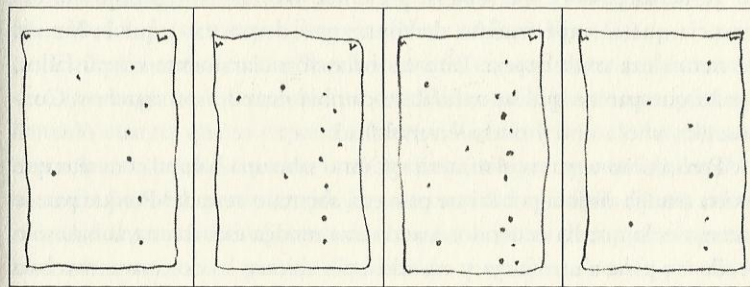


Figura 10.4. Resultado del ejercicio de tiro sobre las sábanas en el caso de la rendija izquierda cerrada.

Ahora se abren las dos rendijas y los soldados pueden vaciar tantos cargadores como sus tímpanos y sus fusiles aguanten.

Cuando cesa la grandiosa traca de los cuarenta mil tiros, el alférez, con sonrisa aviesa, los lleva hacia las sábanas. Los soldados quedan pasmados porque los impactos, en lugar de aparecer alineados en la trayectoria marcada por las rendijas, aparecen en franjas paralelas de intensidad decreciente conforme se separan de las rendijas, pero en claras franjas. Todas las sábanas muestran el mismo patrón.

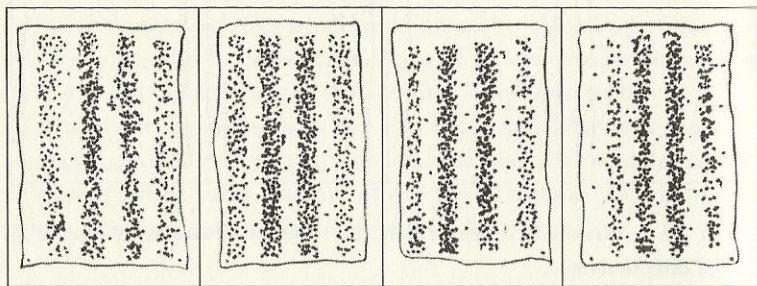


Figura 10.5. Resultado del ejercicio de tiro sobre las sábanas en el caso de dos rendijas abiertas.

¿Qué ha pasado? Las sábanas presentan las mismas figuras de interferencia que el experimento de Young que demostraba que la luz era de naturaleza ondulatoria. Pero las balas son claramente corpúsculos, por lo que parece que su naturaleza cambia cuando son muchos. Corpúsculos uno a uno y ondas en multitud.

Pero ahí no termina el misterio. ¿Cómo sabe una bala en concreto que la otra rendija distinta por la que pasa está abierta o cerrada? Porque parece que eso es lo que ha ocurrido: cuando una rendija está abierta, la bala sólo puede ir a parar a una franja, y cuando están abiertas las dos, esa misma bala tiene la posibilidad de terminar en cualquier franja. No tiene sentido. Para profundizar en este asunto hay que remontarse a cómo se estableció la mecánica cuántica y qué supuso esta nueva teoría de la naturaleza.

El lector quizá recuerde la definición de energía que le dieron en la escuela y que ya hemos utilizado en este libro: la capacidad de producir trabajo. Es la misma que viene en el diccionario de la Real Academia; opino que es una definición correcta pero pobre. En el mito hindú, el dios Vishnú, segundo término de la trinidad bramánica o Trimurti, es el conservador del mundo y se representa de nueve maneras: pez, tortuga, cerdo, monstruo, enano, Krishna, Buda y Rama en la forma de creador o de destructor. Para mí, la mejor definición por analogía del concepto de energía es Vishnú, porque se presenta de muchas maneras: térmica, mecánica, nuclear, hidráulica, solar, etc.; puede transformarse creándose en unas formas y destruyéndose en otras (Rama), pero siempre se conserva. Es más: la energía primitiva que generó el universo en la portentosa Gran Explosión es exactamente la misma que contiene hoy día, trece mil setecientos millones de años después. Por tanto, la energía es, simplemente, nuestro universo.

Las dos manifestaciones más básicas que ha adquirido esa energía son la radiación y la materia. Las expresiones matemáticas de ellas son $E = h \times \nu$ y $E = m \times c^2$. Ya las hemos comentado, pero no está de más que insistamos en ellas. La h y la c son dos valores universales que indican la constante de Planck, un número pequeñísimo, y la velocidad de la luz en el vacío, un número enorme y tan constante como el anterior. La ν es la frecuencia de la radiación y la m la masa de la partícula material. Aunque la primera fórmula es consecuencia del descubrimiento de Max Planck, las dos expresiones se deben a Albert Einstein.

El descubrimiento de Planck consistía en que entre un sistema y otro la energía se intercambia en cantidades múltiplo de una mínima, llamado cuanto, que se expresa así: $h \times \nu$. Recuérdese lo de las distintas monedas: el dinero se puede intercambiar (comprar y vender, absorber o emitir fotones), pero siempre en una cantidad múltiplo de una mínima, en nuestro caso el céntimo de euro. Esto quiere decir que si agarramos un termómetro por su depósito de mercurio, el calor pasará de nuestra mano al aparato (o al revés, siempre del cuerpo más caliente al más frío), y este intercambio lo veremos en la escala de manera continua; pero si la diferencia de temperatura fuera cada vez menor, llegaría-

mos a un punto en que observaríamos que la cantidad de calor transmitida es $h \times v$. Esta cantidad es tan pequeña que sólo se pone de manifiesto a escala atómica.

La constante de Planck h vale, en unas unidades apropiadas, $6,6 \times 10^{-34}$, o sea, cero coma, treinta y tres ceros, y 66. Si la frecuencia de la radiación es tan alta como para que al multiplicarla por un número tan pequeño logre igualar a $m \times c^2$, podrá surgir una partícula de masa m . Dicho de forma más sencilla: la energía podrá cuajar en materia. Esto es lo que ocurre cotidianamente en los grandes aceleradores de partículas, así como en otros procesos de altas energías que se producen en infinidad de escenarios cósmicos. Así pues, hay una estrecha relación entre la materia y la radiación.

Si la radiación se presenta unas veces como corpúsculos y otras como ondas, dependiendo del experimento que se haga, o sea, de cómo se observe (es ondulatoria en el de Young y corpuscular en el fotoeléctrico), parece lógico que las partículas también tengan este carácter dual y haya experimentos que pongan de manifiesto su carácter ondulatorio. Pero antes de afrontar un experimento de este estilo hay que resolver un problema conceptual: ¿qué sentido tiene un comportamiento ondulatorio de un corpúsculo? No se trata de transformar una onda en una bolita, como hemos dicho antes que sucede, sino de dilucidar (nunca mejor dicho) si se puede asociar algún tipo de onda a la bolita. Piénsese que una onda es una forma de propagación, en todas las direcciones posibles desde el emisor, de la energía en un medio: vibraciones de la cuerda de una guitarra en una dimensión, ondas en un estanque producidas por la caída de una piedra en dos dimensiones, sonido en tres, etc.; o en el vacío: luz del firmamento, emisiones de radio y televisión, todas en tres dimensiones.

Un lector avisado, en cuanto se ha hecho un lío con la imaginación tratando de asociar a una partícula una onda del estilo de las que hemos puesto como ejemplos, podría hacer unas cuentas sencillas con las dos fórmulas de Einstein que hemos escrito y concluir que tal onda asociada a una partícula que se mueve a velocidad v , viajaría a una velocidad igual a c^2/v , lo cual da una velocidad siempre mucho mayor que c ,

la velocidad de la luz en el vacío. Esto parece contradecir de plano la propia idea de Einstein de que nada puede viajar a mayor velocidad que c . Así pues, no hay nada que hacer: asociar una onda a una partícula viola el principio de la relatividad de Einstein. (Aunque este principio lo que prohíbe en realidad es que supere a c , la velocidad de transmisión de información.) Sea como sea, ¿para qué rompernos la cabeza ideando un experimento que ponga en evidencia el carácter ondulatorio de los corpúsculos si lo que no puede ser es imposible?

Entonces intervino el príncipe Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie, descendiente, por una parte, de los duques de Broglie, de la corte de Luis XIV, y, por otra, de príncipes que destacaron en la guerra de los Siete Años, en el bando austriaco. Tenemos, pues, a un joven duque francés y príncipe alemán interesado en las mismas misteriosas ondas de materia cuya dilucidación, plasmada en una tesis doctoral, le valió el sublime ascenso aristocrático que, a la vez, simplificó su interminable nombre y prosapia: terminó siendo nada menos que Louis de Broglie, doctor en física.

En esencia, lo que propuso De Broglie fue asignar una frecuencia, magnitud definitoria de una onda, no a un movimiento periódico de la partícula como hizo Einstein con el fotón, sino a unas ondulaciones que acompañaban a la partícula a través del espacio y el tiempo. Las llamó «ondas piloto». Estas ondas, que viajaban a velocidades superiores a la de la luz, se superponían formando un paquete cuya velocidad (la de todo el grupo de ondas) coincidía con la de la partícula y que se mantenía siempre inferior a la de la luz en el vacío.

Imagínese una carrera de cuatrocientos metros lisos en la que participen diez atletas. Cada uno llevará una velocidad distinta. Algunos, los más rápidos, podrán incluso batir el récord mundial, pero la velocidad media del grupo se mantendrá por debajo de tal límite por culpa de los atletas más lentos. Al superponerse ondas de distintas amplitudes y frecuencias, forman un paquete, que es el que ha de asociarse a la partícula (véase la figura 10.6).

Cuando De Broglie presentó su tesis, en 1924, el tribunal de la Universidad de París se quedó boquiabierto. El presidente, nada menos

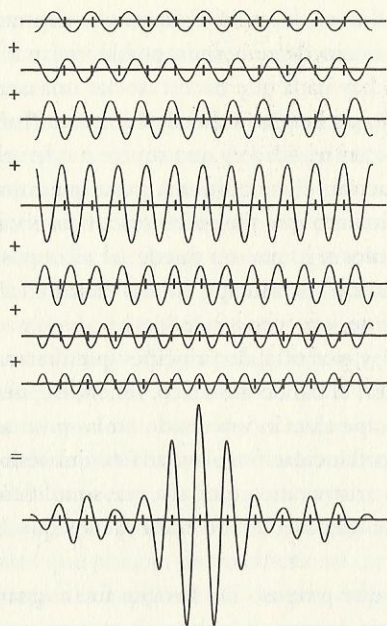


Figura 10.6. Cuando se suman muchas ondas de longitudes de onda ligeramente diferentes, se obtiene una onda más localizada en el espacio.

que el insigne Paul Langevin, le envió una copia a Einstein porque no confiaba del todo en tan extravagante hipótesis, y nadie mejor a quien consultar que el gran pope de la física. La respuesta de Einstein fue contundente: «Creo que la hipótesis de De Broglie es el primer débil rayo de luz sobre el peor de nuestros enigmas en física».

Ahora sí que se podían planear experimentos para poner en evidencia el carácter ondulatorio de las partículas, y la partícula ideal para intentarlo era el popular y asequible electrón. Precisamente el hijo de su descubridor, Thomson, mostró las propiedades ondulatorias de los electrones encontrando modelos de difracción típicos de las ondas al hacerlos pasar entre capas de átomos a modo de rendijas (véase la figura 10.7).

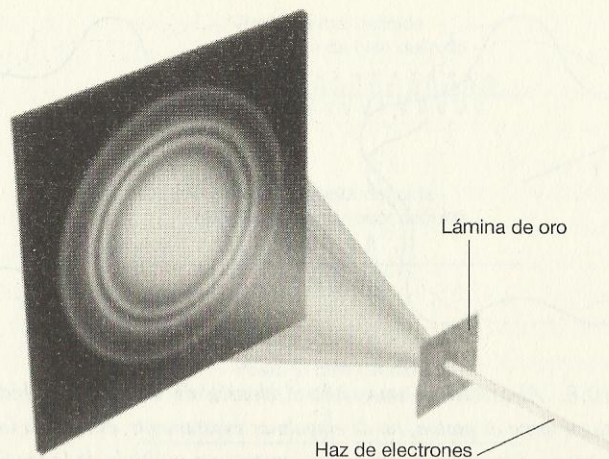


Figura 10.7. Esquema del experimento de Thomson en el que haciendo incidir electrones sobre una lámina fina de oro se obtiene una figura característica de las ondas.

¿Cómo se ha de concebir el átomo ante estas características ondulatorias de los electrones? Recuérdese que Rutherford había demostrado que los átomos contenían un minúsculo núcleo en torno al cual, a gran distancia, giraban los electrones. Como este minisistema solar no era estable, Niels Bohr postuló que los electrones no radiaban energía e, imponiendo la cuantificación de Planck, obtuvo un modelo que reproducía a la perfección los datos experimentales. La idea de De Broglie cambió las cosas de la manera siguiente: las ondas asociadas a los electrones que giran en torno al núcleo son tan estacionarias como las ondas a lo largo de las cuerdas de un violín, de manera que sólo ciertas frecuencias discretas corresponden a las notas musicales. Así pues, las únicas órbitas posibles son aquellas en las que las ondas se ajustan de manera estacionaria, es decir, las que empalman perfectamente.

El átomo de Bohr ya no necesitaba postulados; la idea de los «átomos musicales» regresó con fuerza. Como veremos, una idea de tal be-

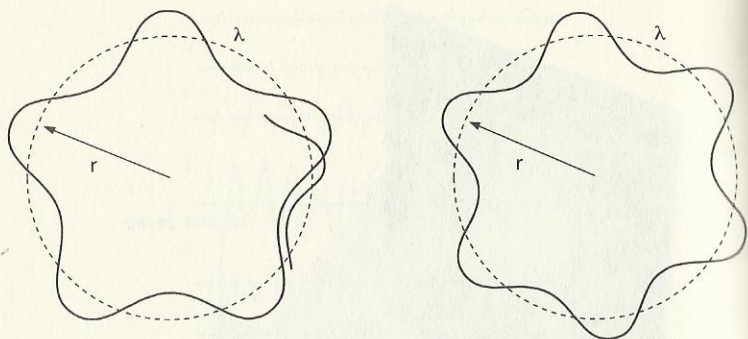


Figura 10.8. Al asociársele una onda al electrón de un átomo de hidrógeno que orbita en torno al protón, ha de empalmar exactamente, es decir, la longitud de la trayectoria circular ha de ser necesariamente un múltiplo de la longitud de onda.

llega sólo podría habersele ocurrido a Schrödinger. Pero, como siempre, nuevos misterios se abrían.

Observe el lector los paquetes de onda de la figura 10.9.

Con ayuda de una regla, trate de medir la longitud de onda (por ejemplo, la distancia entre dos crestas) de cada uno. En el primer caso se puede hacer con bastante precisión midiendo cada uno de los dieciséis ciclos y calculando la media, o midiendo desde el principio hasta el final y dividiendo por dieciséis. En el penúltimo caso hay que conformarse con una sola medición: la precisión es mucho menor. Si esos paquetes están asociados a una partícula, en el primer caso ésta no estará bien localizada; en cambio, en el último sí. Parece, pues, que la precisión en la posición se consigue a costa de la precisión en la longitud de onda. Esta longitud está relacionada con la velocidad. Así pues, tenemos que hacer un balance entre las precisiones con que se pueden determinar la posición y la velocidad de una partícula. Tal vez esto le parezca al lector algo endeble, pero encierra uno de los principios más fascinantes de la física: el de indeterminación. Como hay que retenerlo bien, pondremos otro ejemplo.

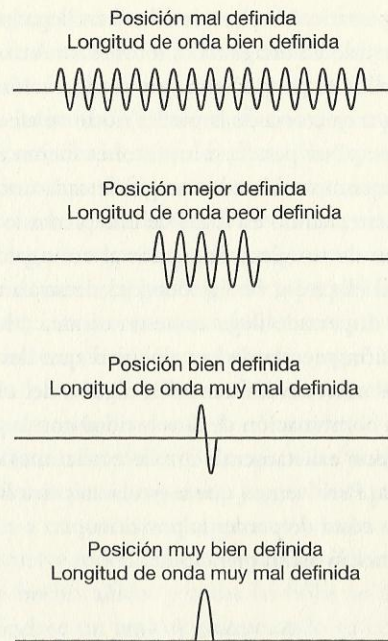


Figura 10.9. Visualización del principio de indeterminación: la precisión en la determinación de la posición se ha de hacer a costa de la precisión que puede obtenerse al determinar simultáneamente la longitud de ondas y viceversa.

Al lanzar una piedra, a ojo podemos describir bastante bien la trayectoria que ha seguido. Vamos a hacerlo un poco mejor. Utilicemos una de esas cámaras fotográficas profesionales que disparan muchas veces seguidas, por ejemplo tres fotos por segundo. El vuelo de la piedra ha tardado cuatro segundos (lo hemos medido con un cronómetro), por lo que hemos hecho doce fotos. Supongamos que hemos tomado las imágenes en el mismo fotograma, es decir, que no se ha activado el mecanismo de arrastre de la película. La imagen que saldrá será la de una sucesión de doce piedras siguiendo una línea parabólica. El proceso ha sido el siguiente. Los fotones de la luz del Sol han incidido sobre la pie-

dra, que los ha dispersado. Muchos de ellos han llegado hasta la cámara, la cual los ha convertido en imagen. Los fotones son una infinidad, pero la energía de todos ellos es pequeñísima en comparación con la masa de la piedra, así que la trayectoria de la piedra no se ve afectada por el choque con los fotones. ¿Qué pasaría si los fotones fueran muchos menos y la masa de la piedra comparable a la energía de cada uno? Podemos imaginar que esto ocurre cuando en lugar de una piedra lo que tratamos de captar es la imagen de un electrón. Adiós al concepto de trayectoria: si un fotón le da al electrón, éste se desviará de su camino, aunque, en cambio, si el fotón dispersado llega a nuestra cámara (ahora un detector) nos dará información precisa de la velocidad que llevaba el electrón; si no le da, no nos ofrecerá información alguna del electrón. ¿Qué es una trayectoria? La combinación de la velocidad con la posición, las cuales se pueden predecir exactamente con las ecuaciones de Newton y de toda la física clásica. Pero vemos que a escala atómica la medición de la velocidad se hace a costa de perder la posición.

Heisenberg enunció así su principio:

$$\Delta x \times \Delta v \geq h/4\pi m$$

La fórmula debe entenderse como sigue: el producto de la indeterminación de la posición (Δx) por la indeterminación de la velocidad (Δv) ha de ser igual o mayor que la constante de Planck h dividida por cuatro π veces la masa de la partícula. Si el producto de dos números que pueden variar es constante, al aumentar uno, el otro ha de disminuir para que se mantenga la constancia. Por ejemplo: $1 \times 6 = 2 \times 3 = 3 \times 2 = 6 \times 1 = 6$; la primera cantidad ha ido aumentando en la forma 1, 2, 3, 6 y la segunda disminuyendo en la cadencia 6, 3, 2, 1 para que el producto sea siempre constante e igual a 6. Así pues, el principio de indeterminación nos dice que cuanto más exactamente queramos medir la velocidad de una partícula, más imprecisa se hace la posición, y al revés.

Muchos autores llaman al principio de indeterminación «principio de incertidumbre»; considero esto erróneo, porque, aunque se admite alguna acepción del término «indeterminación» como indecisión de las personas,

la que no es ambigua es la incertidumbre, que se refiere más a la inseguridad o al estado de duda. A nada de esto último conduce el principio de Heisenberg, porque, lejos de implicar confusión ante las posibilidades de explorar la naturaleza en su intimidad (el microcosmos que suponen los átomos, los núcleos y las partículas elementales), abre vías maravillosas para hacerlo. A pesar de ello, admito que la limitación en cuanto a la precisión que se puede alcanzar en las medidas simultáneas de ciertas magnitudes independientemente de la tecnología (siempre se puede imaginar un instrumento más preciso para medir cualquier cosa) puede producir perplejidad. Una manera con la que suelo deleitar (o eso creo) a mis alumnos de física cuántica con el principio de indeterminación es hacerlos jugar al «billar cuántico».

Juguemos una partida de billar americano (muchas bolas de colores y una blanca) en un mundo donde la constante de Planck, h , sea muy grande y sólo afecte a las bolas. Colocamos las bolas de colores en el triángulo de plástico para empezar a jugar. Nos quedamos pasmados porque empiezan a traquetear enloquecidas y todas se ven tan borrosas que su color se vuelve indefinido. Si el plástico del triángulo no es muy fuerte, se rompe hecho añicos y todas las bolas se desparraman por la mesa, tranquilizándose un tanto y recuperando su color. ¿Qué ha pasado? Que los confines del triángulo son pequeños, por lo que las bolas tenían dentro de él bastante bien definida su posición, pero a costa de que su velocidad se haga muy imprecisa, de manera que puede llegar a ser muy alta. Logramos dejar las bolas dentro de un triángulo muy resistente. Ahora tratamos de colocar la bola blanca en el punto de salida. Antes de que apuntemos con el taco, la bola blanca se ha puesto tan difusa que mucho nos tememos que no le vamos a dar. Es decir: al tratar de dejarla en un punto hemos hecho Δx muy pequeño, por lo que Δv se hace muy grande, y si la indeterminación de la velocidad es grande es porque la propia velocidad se ha hecho muy grande: la bola blanca se mueve en todas las direcciones. Largamos un tacaño a tontas y locas y da la casualidad de que le damos a la bola blanca. La velocidad que le imprimimos es precisamente la que corresponde al impulso que le hemos dado. De inmediato, la bola se hace aún más difusa, de manera que no tenemos ni idea de por dónde anda. Será un milagro si le da a alguna de

las otras bolas que queremos mover. Así no hay manera de jugar de manera fiable al billar, porque la cosa se hace completamente azarosa, de tal modo, que jugaremos más con probabilidades que con certezas.

Aún no tenemos todos los ingredientes para sacarle el máximo jugo al experimento de la rendija doble. Antes hay que hablar de Erwin Schrödinger. Me voy a permitir una digresión por dos razones: la primera, porque el lector puede sentirse perdido y es bueno ofrecerle un respiro; la segunda, porque de todos los padres de la mecánica cuántica ninguno me parece más interesante y de vida tan disipada como la de este artista. No era egoísta ni mal padre (Einstein), no flirteó con los nazis (Heisenberg), no se le murieron o le fusilaron a sus hijos (Planck), no era absorbente (Bohr), no estaba en Babia (De Broglie): a Erwin Schrödinger lo que más le interesaba eran las mujeres. Aunque yo creo que, más que las mujeres, lo que exaltaba a Erwin de verdad era la belleza. Pero no es por esto por lo que he elegido a Schrödinger para ilustrar este capítulo por el lado humano, sino porque, siendo menos popular que los otros, muchos lo consideran como el más grande físico teórico de todos los tiempos. Tal vez no se trate de una exageración tan desmesurada.

Podríamos decir que De Broglie puso los cimientos de la mecánica ondulatoria de las partículas y que un solitario físico de Zurich fue el arquitecto que ideó el edificio.

Erwin Schrödinger había nacido en Viena en 1887, lo que significaba que era ocho años más joven que Einstein y de la misma generación que Bohr, pero bastante mayor que los jóvenes leones de la mecánica cuántica, Heisenberg, Pauli y Dirac, que revolucionaron la física con poco más de veinte años. Esto fue importante en la segunda década del siglo XX, porque muchos respetos y prejuicios entraron en juego en una Europa central en cuyas universidades (y en la vida común) las diferencias de estatus y edad contaban mucho.

El padre de Schrödinger fue decisivo para él porque tenía las cualidades que a todos nos hubiera gustado ver en nuestro progenitor: Rudolf Schrödinger poseía una fábrica de linóleo, o sea, de planchas de yute recubiertas de corcho en polvo amalgamado con aceite para recubrir los suelos, y no sólo la dirigía haciéndola ir viento en popa, sino

que se interesaba profundamente por la botánica, la química y la pintura italiana de todos los siglos. Pero a lo que era más aficionado el inquieto vienés era a su único hijo, Erwin. Le encantaba enseñarle de todo a su hijo, a la vez que procuraba que se lo pasara en grande.

Erwin estudió en el Akademische Gymnasium, una institución que destacaba en literatura y lenguas muertas. Ahí empezó su afición por los idiomas, de manera que a lo largo de su vida hizo las delicias de las audiencias más variadas dando conferencias, además de en alemán, en inglés, francés y español, que pronunciaba sin apenas acento extranjero.

Después del instituto, Schrödinger entró en la Universidad de Viena y se interesó por todo, en particular por la filosofía. Pero la universidad estaba conmocionada por el suicidio de su más excelso profesor: el físico Ludwig Boltzmann, que se había ahorcado tras varios intentos y numerosas crisis depresivas. Schrödinger siguió varios cursos de física tratando de entender por qué se hablaba tanto de la obra de Boltzmann. Pronto comprendió que aquella ciencia era realmente bella y que la pérdida de aquel hombre había supuesto una verdadera tragedia no sólo para Austria, sino también para el mundo. Estando Schrödinger ocupado en esto, conoció los nuevos desarrollos de la física del átomo, los electrones, las indeterminaciones y demás, que no le gustaron en absoluto. Consideraba que, a diferencia de la física clásica, aquello estaba plagado de contradicciones y sinsentidos. Las intervenciones de aquel peculiar estudiante de filosofía en seminarios de física y, sobre todo, de matemáticas despertó la curiosidad y la admiración de todos.

Estalló la Gran Guerra y, con veintisiete años, Erwin tuvo que irse al frente. Fue oficial de artillería en Italia, en las filas del ejército austro-húngaro. Lo distinguieron con varias condecoraciones, porque los ángulos de tiro y las trayectorias calculadas por Schrödinger debían de ser tan exactas que las baterías que mandaba eran letales para el enemigo. Resultó herido, y terminó la guerra enseñando meteorología a oficiales del ejército y aprendiendo la teoría de la relatividad general de Einstein, que sí consideraba excepcionalmente bella.

Sin embargo, a Schrödinger seguía apasionándole más la filosofía que la física, por lo que después de la guerra quiso dedicarse parcial-

mente a enseñar física y a meditar todo lo que pudiera. Encontró una plaza en la Universidad de Czernowitz que le permitía combinar ambas actividades, pero desgraciadamente (por fortuna) ocurrió algo que se lo impidió. Czernowitz dejó de ser austriaca y se incorporó a Alemania. Uno de los muchos cambios que conllevó aquello se reflejó en la decisión de las autoridades académicas de que combinar la física y la filosofía era una extravagancia. Así pues, por estos extraños motivos, Schrödinger tuvo que dedicarse por completo a la física.

En Alemania, desde tiempos inmemoriales hasta hoy día, los catedráticos de universidad siguen un camino itinerante hasta que acaban en la que desean. En España antes era igual pero, a diferencia de Alemania, los méritos no intervenían en los desplazamientos y la trayectoria era más bien una espiral que terminaba en Madrid. Schrödinger, de la mano de Max Planck, terminó en 1927 en la Universidad de Berlín, teniendo como compañeros al fundador de la mecánica cuántica, a Einstein y a Max von Laue, maestro de la cristalografía y también premio Nobel de Física. Aquellos fueron los mejores años de la vida de Schrödinger.

¿Cómo le sentó a un exaltado amante de la belleza la irrupción del nazismo en su país? Como un calambrazo. Aunque no era judío y su futuro como sucesor de Planck era brillante (el nuevo régimen pensaba designar a Planck para más altos cargos), Schrödinger respondió marchándose de Alemania. Él fue de los pocos intelectuales de talla que se exiliaron sin ser forzados a hacerlo.

Dicen que detrás de cada gran hombre hay una gran mujer. Yo soy más bien de los que opinan que lo que hay detrás de cada eminencia es una mujer... sorprendida. Ninguno de los dos fue el caso de Anne Marie (Anny) Bertel, la singular esposa de Schrödinger. Que una esposa sea tolerante con un marido mujeriego siempre ha sido sorprendente, incluso en aquellos tiempos, pero es que Anny no sólo soportaba las aventuras eróticas de Erwin, sino que participaba en muchas de ellas. Un papel curioso que desempeñaba era el de espantar a la joven amante de turno de su marido cuando él se cansaba de ella. La buscaba, se ponía en plan de legítima indignada y asustaba a la amante por más arrestos que ésta le echara al afrontar la situación.

Cuando Schrödinger inició su peregrinaje de exiliado por Oxford, Madrid, Gent, Roma y Dublín, donde el presidente Eamon de Valera le había ofrecido un Instituto de Estudios Avanzados, dejó perplejas a sus audiencias. Por un lado, hacía las delicias de la audiencia hablando en el idioma apropiado de los temas más insospechados aparte de la física: folclore y antropología local, filosofía, música, etc. Pero, por otro lado, escandalizaba el hecho público y notorio de que su mujer y su amante le acompañaran y vivieran con él. Piense el lector que hablamos de la década de 1930 (véase la figura 10.10).

El caso es que Schrödinger concebía el amor como exaltación de la belleza y el sexo como una vía para alcanzar la trascendencia y la perpetuidad de sí mismo. Por supuesto, tuvo un montón de hijos ilegítimos.

Aunque a Schrödinger se le conoce fundamentalmente por su ecuación de ondas, trabajó en una inmensa variedad de aspectos, como la teoría del color, la mecánica estadística, la teoría general de la relatividad, la teoría unificada de los campos, la teoría de los calores específicos, etc. En 1944 escribió incluso un opúsculo (cuya traducción al español tengo sobre mi mesa y es uno de los libros más interesantes que he leído jamás) titulado *¿Qué es la vida?* Es impresionante lo que dice en él de los genes antes de que se descubrieran, de la diferenciación celular y demás aspectos de la biología molecular que está empezando a definir el siglo XXI. Francis Crick, el codescubridor con James Watson del modelo en hélice doble del ADN, era físico, pero se pasó a la biología por el impacto que le produjo el librito de Schrödinger.

En 1933, a Schrödinger le concedieron el premio Nobel, compartido con Dirac. El año anterior se lo habían concedido a Heisenberg. A Schrödinger y Dirac se lo concedieron «por el descubrimiento de nuevas formas productivas de la teoría atómica», razón que se me antoja misteriosa; a Heisenberg «por la creación de la mecánica cuántica, la aplicación de la cual, *inter alia*, ha llevado al descubrimiento de formas alotrópicas del hidrógeno», razón tan ambigua como la anterior. Lo que hicieron de verdad los tres científicos fue formular la mecánica cuántica de una manera matemática (Heisenberg), de otra completamente distinta, casi antagónica (Schrödinger), y demostrar que ambas



Figura 10.10. Erwin Schrödinger.

eran equivalentes (Dirac). Como no voy a confundir al lector con las matrices algebraicas y las ecuaciones diferenciales, pues el objetivo es que comprenda todas las sutilezas del experimento de la rendija doble, voy a hacer hincapié sólo en la mecánica ondulatoria de Schrödinger.

Después de mucha indecisión y con la esperanza de que el editor de este libro no me la tache, voy a escribir la ecuación de Schrödinger. Ante el posible rechazo del lector, le prometo que resaltaré sólo los as-

pectos bellos de la misma, sin abrumarlo con sus intimidades físicas y matemáticas. Ahí va:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + V(r)\Psi$$

Para aliviar al lector antes de hablar en serio sobre esta fórmula, le contaré dos anécdotas sobre ella. Está perfectamente documentado —por dos cartas que escribió Schrödinger a su amigo Einstein, fechadas antes y después de las navidades de 1925— cuándo, dónde y cómo la descubrió. Cuándo: está dicho; dónde: en un romántico hotel de Arosa, en los Alpes suizos, cuyos dueños lo conocían bien porque el profesor lo frecuentaba con sus amantes; cómo: pasando las vacaciones navideñas con una jovencita cuyo nombre nadie conoce a pesar de que muchos historiadores, como Walter Moore, han puesto empeño en averiguarlo porque compara este misterio con el que supuso la enigmática mujer que inspiró ciertos sonetos de Shakespeare.

Por otro lado, diré que muchos colegas de otras especialidades me gastan bromas diciendo que un físico atómico y nuclear como yo no es más que alguien que se pasa la vida resolviendo la ecuación de Schrödinger, lo cual es verdad, aunque jocosamente simplificado.

Observe el lector la fórmula otra vez. La Ψ es la llamada «función de onda», es decir, una expresión matemática cuya representación es una onda. También puede ser una suma (se llama «superposición») de muchas parecidas, porque una ecuación de este tipo tiene la peculiaridad de que, si dos o más funciones la cumplen, también la cumple la suma de las dos o de todas ellas. Así pues, Ψ puede ser también un paquete de ondas asociado a la partícula, como decía De Broglie. La i no es más que la unidad de los números imaginarios, es decir, $\sqrt{-1}$, o sea, la raíz cuadrada de menos uno, que no tiene posibilidad real de ser calculada. La extraña letra \hbar no es más que la constante de Planck, h , dividida por 2π . La m es la masa de la partícula. Mucho más interesante que las magnitudes anteriores es la $V(r)$: es la energía potencial o, lo que es igual, la fuente de las fuerzas a que está sometida la partícula. Por ejemplo, la Tierra y la Luna están sometidas a un potencial gravitatorio que da origen a las fuerzas que las mantienen uni-

das. Un electrón en un cristal o en un átomo estará sometido a otro potencial distinto del anterior, un quark dentro de un protón a otro, etc. En esto tenemos la explicación de la broma de mis amigos: cualquier problema de la física viene definido por el potencial que entra en juego. La expresión de esta $V(r)$ define la ecuación de Schrödinger haciéndola más o menos difícil de resolver, por eso nos pasamos la vida resolviéndola al aplicarla a infinidad de casos. Los símbolos $\partial/\partial t$ y $\partial^2/\partial r^2$ son las fluxiones, según Newton, o las derivadas, según Leibniz, de la función de ondas respecto al tiempo t y a la posición r , en este último caso aplicada dos veces. Esto no es más que la variación de la función de onda o paquete de ondas respecto al tiempo (su evolución) y al espacio (su desplazamiento). Así pues, la ecuación de Schrödinger es equivalente a las de la mecánica clásica, por ejemplo las de Newton, pero en lugar de describir cómo se mueve la partícula sometida a fuerzas o, dicho de otra manera, la evolución de la energía, lo que describe es la onda asociada a aquélla. Aplicada al átomo, nos da los átomos musicales de los que ya hemos hablado.

¿Y esto es tan importante? ¡Ay, amigo lector! Me sentiría extraordinariamente dichoso si lograra transmitir la importancia de esta ecuación. Como ya hemos dicho, con ella nos jugamos la existencia del mundo material. No exagero.

Obsérvese el siguiente dibujo:

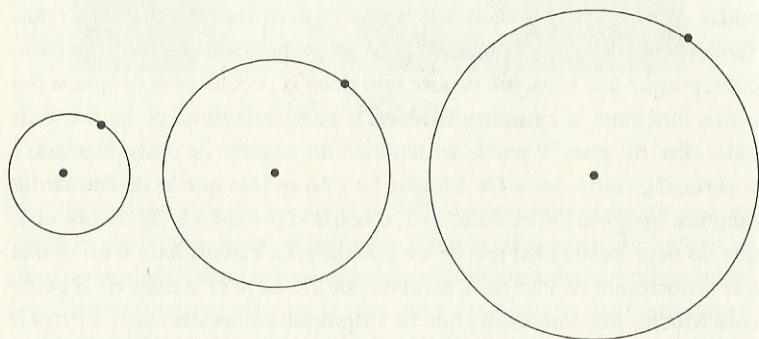


Figura 10.11. Las tres primeras trayectorias del electrón en torno al protón del átomo de hidrógeno en el modelo de Bohr.

Representan el átomo de hidrógeno según Rutherford y Bohr, es decir, las primeras órbitas que puede seguir el electrón en torno al protón. No puede estar en órbitas intermedias, porque sus radios están cuantificados.

Obsérvese ahora este otro dibujo:

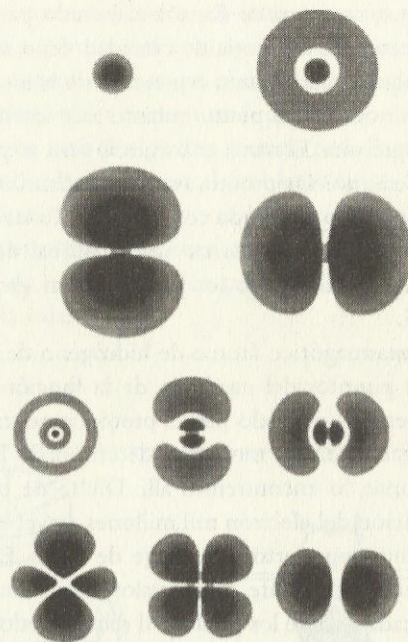


Figura 10.12. Distribuciones de la probabilidad de presencia del electrón en las vecindades del protón en el átomo de hidrógeno.

Representan lo mismo en el modelo de Schrödinger, es decir, las soluciones de su ecuación para el átomo de hidrógeno, el más simple de la naturaleza. ¿Dónde está el electrón? Ni se sabe, lo cual parece compatible con el principio de indeterminación de Heisenberg: está en el entorno del protón, pero como esa determinación en la posición

implica una gran indeterminación en la velocidad, le pasa como a las bolas del billar cuántico: el electrón se hace «difuso».

Aun así, ¿qué son esas figuras? Representan las distribuciones de probabilidad de presencia del electrón en torno al protón. Esta probabilidad se determina simplemente elevando al cuadrado la Ψ , función de ondas de Schrödinger. Esto es muy, pero que muy raro.

Imagine el lector un mapa de España elaborado para el 22 de diciembre, día del sorteo de la lotería de Navidad. Sólo se ven puntitos iluminados por doquier. Cada punto representa un habitante que juega a la lotería. La luminosidad del punto es tanto más intensa cuanto más dinero juega cada persona. El mapa es original, pero se parece bastante a un mapa de verdad, ¿no? De pronto, a media mañana, un niño de San Ildefonso canta el número agraciado con el gordo. Todas las lucecitas se apagan y sólo destella una ubicada en San Cristóbal de la Polantera, provincia de León. En tal pueblo los puntitos eran escasos y tenues, pero ha tocado allí.

Volvamos al fantasmagórico átomo de hidrógeno de la figura anterior. Las nubes de puntitos del cuadrado de la función de ondas del electrón en el potencial generado por el protón muestran la probabilidad de que, *si medimos* en un momento determinado la posición del electrón en un punto, lo encontremos allí. Dicho de otra manera, si midiéramos la posición del electrón mil millones de veces, lo encontraríamos en cada punto un cierto porcentaje de veces. Este porcentaje viene determinado, precisamente, por el valor del cuadrado de la función de ondas en cada uno de los puntos. Al dibujar todos esos porcentajes nos sale la figura anterior.

Y si no medimos, ¿dónde diablos está el electrón? Porque en alguna parte estará, ¿no? La pregunta puede responderse diciendo que no tiene sentido, porque es lo mismo que preguntarse dónde ha caído el gordo de Navidad antes de que se inicie el sorteo. Pero, ojo, porque esta pregunta conduce directamente a esta otra: ¿está la Luna ahí si no la miramos?

Esta interpretación probabilística de la función de ondas de Schrödinger fue formulada un físico llamado Max Born, y ni al propio Schrödinger ni a su amigo Einstein les gustaba mucho. Éste decía a

menudo aquello de que Dios no juega a los dados. En cambio, a Bohr y a Heisenberg les entusiasmaba tanto esta interpretación y tenían tal capacidad de convencimiento (de lavado de cerebro, decían sus críticos) que pronto se le llamó «la interpretación de Copenhague». Del comentario de Einstein opinaban que no debía meterse en lo que debía o no hacer Dios.

Hay libros enteros dedicados a la interpretación probabilística de la función de ondas, porque esta concepción de la naturaleza atenta contra problemas tan profundos como el de la causalidad, el determinismo, etc. Pero sería demasiado osado introducir al lector en esos asuntos, así como en el de las variables ocultas y otros, para llegar al experimento de la rendija doble. Baste ilustrar el problema como lo hizo Schrödinger, porque además de ilustrativo es hasta cierto punto conocido. Se trata de un experimento imaginario que ideó Schrödinger para mostrar lo absurdo de la interpretación probabilística de su función de ondas: el gato en la caja.

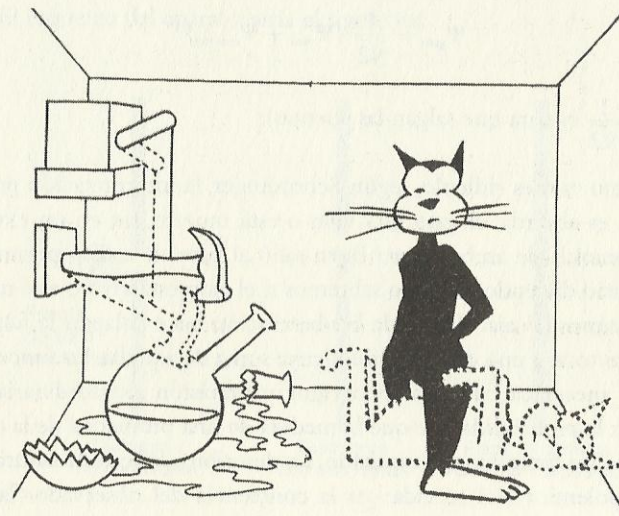


Figura 10.13. Esquema del experimento imaginario del gato de Schrödinger.

Encerremos un gato vivo en una caja que cierra perfectamente (no se puede ver nada desde fuera) y dentro de la cual hay un mecanismo diabólico formado por una fuente radiactiva, un contador Geiger, un martillo y una ampolla de vidrio cerrada que contiene un gas venenoso. El mecanismo funciona así: cuando la fuente radiactiva sufre una desintegración, el contador la detecta y suelta el martillo; éste cae sobre la ampolla y la rompe, el gas se libera y el gato muere. Supongamos también que la teoría cuántica predice que la probabilidad de que la sustancia radiactiva sufra una desintegración es del 50 por ciento en una hora. Después de una hora desde que se encerrara al gato, hay las mismas probabilidades de que el gato esté vivo que esté muerto.

Según la interpretación de Born, pasada una hora, el gato no está ni vivo ni muerto, sino en una mezcla de los dos estados, es decir, su estado (función de ondas) es una suma (superposición) de los dos estados (las dos funciones de onda). Dicho matemáticamente:

$$\Psi_{\text{gato}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ \Psi_{\text{vivo}} + \Psi_{\text{muerto}} \}$$

(El $\frac{1}{\sqrt{2}}$ es para que salgan las cuentas).

Como esto es ridículo, según Schrödinger, la interpretación probabilística es absurda: el gato está vivo o está muerto, no en un extraño estado mezcla de ambos. Pero Born salió al paso de este experimento imaginario diciendo que sólo sabremos si el gato está vivo o está muerto si abrimos la caja: el acto de la observación hace colapsar la función de ondas total a una de las posibles cuya suma da aquélla. Lo único que hace la mecánica cuántica (con rigor y precisión extraordinarias) es predecir la probabilidad de que la medida de una propiedad de la naturaleza dé un determinado resultado, no describir cómo es la naturaleza.

La polémica está servida: ¿es la conciencia del observador la que provoca el colapso de la función de ondas?, ¿puede hacerla colapsar un microbio?, ¿cuenta para algo la conciencia del gato?, ¿existe el electrón,

y de qué manera, antes de que midamos algo de él? En definitiva, ¿cómo sabemos que la Luna está ahí si no la miramos? A día de hoy aún no hay respuesta definitiva a si existe el mundo fuera de nuestra conciencia o no. Platón y Demócrito, Lenin y los empiriocriticistas, Bohr y Einstein, los materialistas y los idealistas... Hace poco, asistí a un seminario en el que se trató de establecer matemáticamente que hay más indicios de que el mundo no existe de manera objetiva fuera de nosotros que de lo contrario, pero las conclusiones estaban lejos de ser claras y definitivas. Así están las cosas, en un interregno extraño entre la física de Newton y otra que, sin duda, está por llegar. Pero mientras tanto la mecánica cuántica está dando tantos frutos que nuestra vida sería muy distinta sin ella: televisores, ordenadores, teléfonos móviles, artefactos espaciales, etc., no funcionarían si algunas de sus partes esenciales no se hubieran diseñado siguiendo con rigor los dictados de la mecánica cuántica.

Hasta aquí los prolegómenos al experimento de la rendija doble, el corazón de la mecánica cuántica.

El esquema del aparato sería el siguiente:

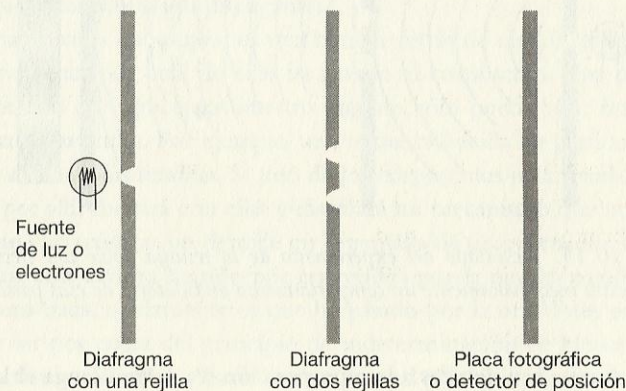


Figura 10.14. Disposición de los elementos para desarrollar el experimento de la rendija doble con electrones.

No hay que explicar mucho porque ya lo hicimos en el capítulo de Young y al principio de éste: una fuente de luz (lo repetiremos punto por punto con electrones) pasa por un diafragma enfocado sobre una pantalla con dos rendijas tras la cual colocamos otra pantalla que recoja el resultado, por ejemplo, una placa fotográfica.

Encendemos la bombilla, y ya sabemos lo que pasa: el frente de ondas (imaginamos la luz como ondas) se desdobra en dos frentes en cada rendija.

Ya hemos hablado del patrón de interferencia del fenómeno de difracción: las ondas, las crestas y todos los demás puntos se refuerzan o contrarrestan produciendo las franjas.

Desde el punto de vista de las funciones de onda de Schrödinger ya sabemos cómo asignaríamos (igual que en el modelo de la física clásica) cada estado:

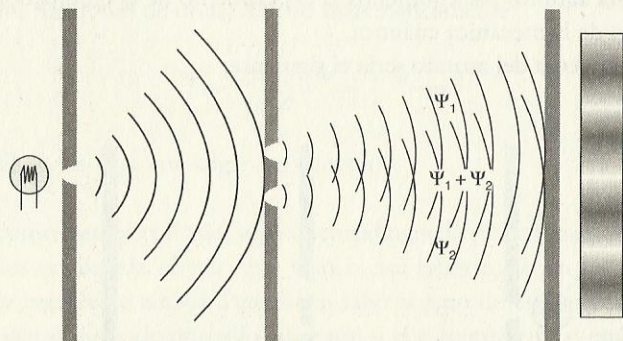


Figura 10.15. Resultado del experimento de la rendija doble con electrones que muestra inequívocamente un comportamiento ondulatorio de esas partículas.

Las franjas son debidas a la superposición $\Psi_1 + \Psi_2$. (Tenga el lector en mente lo de $\Psi_{\text{vivo}} + \Psi_{\text{muerto}}$.)

Ahora lo repetiremos todo pero con un cañón de electrones en lugar de una bombilla. O sea, con corpúsculos. Sólo tenemos que susti-

tuir la placa fotográfica por un contador que recorra el espacio tras la pantalla de la rendija doble (recuerde el lector el ejercicio de tiro al blanco). El resultado es el mismo: franjas que demuestran el carácter ondulatorio de las partículas.

Pero todo esto, a estas alturas del libro, no sorprende al lector porque ya lo sabía. Ahora repetimos el experimento, pero con la bombilla y el cañón ajustados de tal manera que cada fotón y cada electrón salen de uno en uno. Cada corpúsculo produce un destello o impacta en el detector en lugares aleatorios, pero poco a poco, conforme aumenta el número de ellos, van apareciendo las franjas cada vez más nítidamente e idénticas en ambos casos. El lector puede estar pensando que, como ya apuntamos, los fotones y electrones se comportan como partículas de uno en uno y como ondas cuando son muchos, ¿no? Ni hablar. Si repetimos este último experimento, con fotones y electrones de uno en uno, con sólo una rendija abierta, no aparece ninguna franja. ¿Interfiere cada fotón o electrón consigo mismo? ¿Cómo sabe cada fotón o electrón al atravesar una rendija si la otra está abierta o no? Parece como... ¡si cada fotón o electrón pasara por las dos rendijas a la vez! No puede ser, pero como la mecánica cuántica es tan rara, vamos a tratar de dilucidar si las partículas son inteligentes.

Imaginemos que ponemos una trampa detrás de una de las rendijas para averiguar por cuál de ellas ha pasado el corpúsculo. Una trampa así, por más que agucemos nuestro ingenio, sólo puede estar formada por otras partículas. Por ejemplo, una tenue nubecilla de partículas en torno a una de las rendijas. Si uno de los corpúsculos pasa a toda velocidad por allí, chocará con ellas y disparará un mecanismo que nos dirá (con un clic acústico, un destello en la pantalla de un ordenador, lo que sea) que con certeza ha sido por esa rendija por la que ha pasado y, si no suena nada, obviamente es que ha pasado por la otra. Pues esto no puede ser por culpa del principio de indeterminación de Heisenberg. Las partículas deladoras estarán sometidas a tal principio, de manera que la indeterminación de la posición nunca va a poder ser menor que la distancia entre las dos rendijas. O sea, que no hay invento que valga para saber por cuál de las dos rendijas ha pasado el corpúsculo. La im-

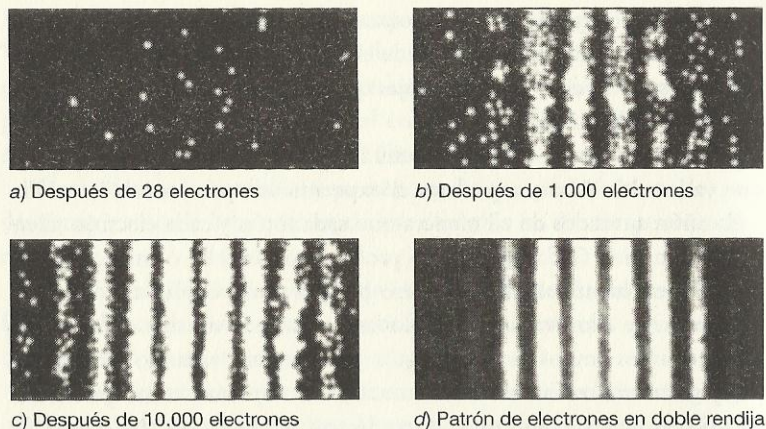


Figura 10.16. Resultado de uno de los muchos experimentos reales de la doble rendija.

posibilidad de tal observación es compatible con que cada corpúsculo haya pasado por las dos rendijas a la vez. (Si no podemos abrir la caja, el gato estará a la vez vivo y muerto; sólo sabemos que tenemos una probabilidad del 50 por ciento para cada caso cuando abramos la caja.)

Las conclusiones son las siguientes:

1. Las dos manifestaciones de la energía, es decir, los dos componentes del universo, radiación y materia, tienen carácter corpuscular y ondulatorio simultáneamente.
2. Esta dualidad onda-corpúsculo no se puede poner de manifiesto en un mismo experimento: o preparamos un aparato para poner en evidencia una naturaleza o la otra. Ambos caracteres son complementarios.
3. Las leyes de la física no nos permiten predecir el resultado de una medición de la naturaleza, sino la probabilidad de que ocurra.
4. No podemos saber cómo es el mundo a menos que lo observemos, y el proceso de observación lo altera.

El primer experimento de verdad de la rendija doble se hizo, como hemos visto al principio del capítulo, en 1961, décadas después de haber sido concebido y de que sus resultados hubiesen sido aceptados. Lo llevó a cabo Claus Jönsson en la universidad alemana de Tübinga. Tanto él como los científicos que se animaron a repetirlo posteriormente (es un experimento muy difícil y produce más frustración que gloria), publicaron sus resultados en revistas de pedagogía de la física en lugar de en las dedicadas a los resultados de la investigación. En honor a Jönsson y todos los demás, casi anónimos, que convirtieron en real un experimento imaginario, reproduzco la figura de interferencia de electrones que obtuvo aquél (véase la figura 10.16).

Como puede verse, estos sofisticados experimentos reproducen a la perfección un producto del cerebro humano concebido tres cuartos de siglo antes.

Epílogo

El lector decidirá si los objetivos expresados en la introducción de este libro se han cumplido o no. Sólo me resta explicarle por qué lo he escrito pensando en él como padre o madre de chavales adolescentes. Si recuerda bien los apuntes biográficos de los autores de los experimentos, en todos he resaltado las circunstancias de las familias en cuyo seno nacieron. Casi todos los personajes tuvieron padres ilustrados que desde pequeños los encauzaron hacia la curiosidad y el saber. Naturalmente, todos eran ricos. Hoy día tenemos acceso a una cantidad de información inmensamente superior a la que tenían los ricos de cualquier época pasada. La conclusión es obvia: lo único decisivo para que los niños perciban una atmósfera familiar propicia a la creatividad científica es la actitud de sus padres. Las escuelas y sus propias habilidades harán su función, pero sin dicha actitud se verá muy dificultada. Si este libro ha contribuido a crear ese ambiente familiar, aunque sea en muy pequeña medida, me sentiré satisfecho.

He utilizado tal cantidad de bibliografía y páginas de internet que irritaría al editor con una relación pormenorizada. Además de los ya mencionados en el texto, hago honor a todos los autores consultados citando sólo *Great Physicists* de William H. Cropper (Oxford University Press, 2001).

El lector, sobre todo si es físico, habrá encontrado algún error o errata. Soy el único responsable y me disculpo; pero serán muy pocas las incorrecciones que halle porque el manuscrito lo ha corregido José Manuel Quesada Molina, amigo, compañero y físico riguroso al que quedo agradecido.

Índice alfabético

- aberración cromática, efecto de la, 91
Academia de Ciencias de París, 159, 165-166, 168-169, 171, 172
Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, 191
Accademia dei Lincei, 58-60
aceleradores de partículas, 212, 220
agua, moléculas de, 28-29, 30
Akerblad, Johann, traductor de símbolos jeroglíficos, 153
Alberto Magno, san, 101
Albrecht de Bavaria, duque, 48
Alejandría, Biblioteca de, 33, 38-39, 151
Alejandro Magno, 39, 151
alquimia, 114-115, 123
Amato, Angelo, arzobispo, 76
Ana Estuardo, reina de Gran Bretaña e Irlanda, 119
Arago, François, director del Observatorio de París, 159-160, 165
arco iris, formación del, 99-101, 100, 102, 142
Aristóteles, 17, 28, 47-49, 51, 54, 69, 71, 88, 95, 99, 114, 115; estudios del movimiento, 77, 79, 80, 82; y la formación del arco iris, 100-101, 100
Arquímedes, 13-31, 38, 41, 49, 52, 59, 83, 132; cálculo infinitesimal, 19; leyes de óptica geométrica, 16; ley de la palanca, 16, 20, 24; polea múltiple o polipasto, 19-20, 20; principio fundamental de la hidrostática, 11, 15, 21-28, 26, 28; superficie de una esfera, 18; tablas de densidades, 22-23; tornillo de, 52; valor del número π , 18; volumen de un cilindro, 18; *El cálculo de los granos de arena*, 18; *Sobre las espirales*, 17-18
átomos, 27, 140, 175, 181; de helio doblemente ionizados, 203; de hidrógeno, 234, 235, 236; radiactivos, 201; relación con la luz, 142, 144
balanza de torsión de Cavendish, 135-138
Ball, sir Robert, 196
Barberini, Maffeo, cardenal, 60, 65; poema «Adulatio Perniciosa», 66
Bardonius, Cesare, cardenal, 62
Barton, Catherine, media sobrina de Newton, 117, 119
Becquerel, Henri, 197-198, 199
Becquerel, saga de físicos franceses, 197
Beichner, R. J.: *Física para ciencias e ingeniería*, 129, 133

- Bellarmino, Roberto, cardenal, 58-59, 63-65, 73
- Bertel, Anne Marie (Anny), esposa de Schrödinger, 230
- Biblia, teoría copernicana y la, 61-63
- Bickerton, Alexander, liberal radical, 195
- Biot, Jean-Baptiste, físico, 121
- Bohr, Niels, físico atómico, 208, 223, 228, 235, 239
- Boltzmann, Ludwig, físico, 229
- Born, Max, físico, 236; y el gato de Schrödinger, 238
- Borrow, Isaac, catedrático de matemáticas, 89
- Bouchard, Pierre-François, teniente, 152
- Brahe, Tycho, astrónomo real danés, 109
- Brewster, David, biógrafo de Newton, 115
- Brogie, príncipe Louis-Victor Pierre Raymond de, físico, 221, 228, 233; ondas piloto de, 221
- Broughan, lord, 126
- Bruno, Giordano, 53, 57, 76
- Caccini, Tommaso, dominico, 62
- cálculo infinitesimal, 19, 89, 105-108
- Calímaco, 38
- campo eléctrico, 179-180, 180, 186
- carga eléctrica, 179-181, 183-188, 188
- Castelli, Benedetto, estudiante de Galileo, 61
- Catalina, zarina, 144
- Cavendish, Henry, 121-138, 125, 128; balanza de torsión de, 135-138; composición de los gases, 123; constante gravitacional universal G , 129-137, 129, 134, 136; descubrimiento del condensador, 124; ley del cuadrado inverso a la distancia de la fuerza entre cargas eléctricas, 124; termómetro de, 126; artículo «Factitious Airs», 123
- Cavendish, lord Charles, padre de Cavendish, 121-122, 126
- Cavendish, lord George, sobrino de Cavendish, 128-129
- células fotoeléctricas, 188-189
- César, Julio, 39-40, 151
- Cesi, príncipe Federico, 58, 60
- Chadwick, James, descubrimiento de los neutrones por, 212
- Cicerón, 13
- Clark, boticario de Grantham, protector de Newton, 85-86, 90
- Cleopatra VII, 39, 151
- Cockcroft, John D., físico, reacciones nucleares de, 212
- Colombe, Ludovico della, 59-60
- Colón, Cristóbal, 33, 43
- color, teoría del, 89, 96-97
- condensador, descubrimiento del, 124
- Conduitt, John, millonario, biógrafo de Newton, 119
- Confucio, 43
- Consejo de Investigación Nacional de Estados Unidos, 191
- constante de Planck, 190-191, 219-220, 227, 233
- Contarini, Niccolò, 55
- coordenadas, definición de las, 34-36, 37
- Copérnico, 53, 63-64, 68, 71, 87, 162
- Cosimo II de Medici, gran duque de la Toscana, 56, 60, 66
- Coulomb, Charles, 123; ley de, 124

- Crease, Robert, historiador de la ciencia, 9
- Cremonini, Cesare, filósofo aristotélico, 59
- Crick, Francis, codescubridor de la estructura del ADN, 231
- Cristina de Lorena, gran duquesa de Toscana, 60, 61-62, 66
- cuadrado inverso a la distancia, ley de, 109-113
- cuanto, concepto de, 190
- Curie, Marie, física, 199
- Cysat, Johann Baptista, jesuita tedesco, 58
- Daguerre, Louis-Jacques, inventor de los daguerrotipos, 157
- daguerrotipos, obtención de, 157-158
- Degli Ammannati, Giulia, madre de Galileo, 47-48
- Demócrito, 27, 114, 140, 142, 144-145, 239
- Descartes, 31, 87; y la descomposición de la luz, 96, 99, 102; *La Géométrie*, 88; *Météorologie*, 93, 101
- desintegración atómica, 201
- detector de humos, invención del, 202, 203
- De Valera, Eamon de, presidente irlandés, 231
- Deville, Henri Sainte-Claire, químico, 172
- Diodoro, 13
- Dirac, Paul, físico, 228, 231-232
- Donné, Alfred, profesor de medicina de Foucault, 157, 159, 162, 171-172
- Duillier, Fatio de, matemático, 117-118
- Einstein, Albert, 16, 83-84, 191, 228, 230, 236, 239; carácter corpuscular de la luz, 190; interpretación del efecto fotoeléctrico, 190, 214; y el principio de equivalencia, 135; relación entre masa y energía, 140, 219-220; teoría de la relatividad especial, 184; teoría de la relatividad general, 161, 170, 185, 221, 229
- electricidad, concepto de, 173-174
- electrolisis, 181
- electromagnetismo, 194, 208
- electrón: carga del, 182, 185, 207; concepto de, 175; descubrimiento del, 179, 181, 185, 194; en el núcleo atómico, 207, 214; origen de la palabra, 174, 180; probabilidad de presencia en torno al protón, 235, 235-236
- Elsevier, Louis, impresor holandés, 75
- energía, concepto de, 219
- Epicuro, 17
- equivalencia, principio de, 135
- Eratóstenes de Cirene, 17, 33, 37-45, 69, 127; director de la Biblioteca de Alejandría, 40; medida de la circunferencia terrestre, 40-45, 133; *Geografiká*, 40
- espacio, medición del, 77
- estaciones, causa de las, 33-34
- éter, y la propagación de la luz, 143, 145, 161, 175, 184
- Euclides, 17, 48; *Elementos*, 87
- Euler, Leonhard, 144-145
- Faraday, Michael, 123
- Federico el Grande de Prusia, 144
- Fermat, Pierre, matemático, 31
- Fernando II de Medici, gran duque de Toscana, 54, 66, 71, 73
- Feynman, Richard, físico, 213

- Fidias, astrónomo, padre de Arquímedes, 17
- física cuántica, 185, 207, 213
- Fizeau, Hippolyte, amigo de Foucault, 158-162; experimento para determinar la velocidad de la luz, 161, 162
- flogisto, teoría del, 123
- fluctuaciones cuánticas, 139
- fluorescencia, efecto de la, 197
- fluxiones de Newton, 105-108, 111; véase también cálculo infinitesimal
- Foscarini, Paolo Antonio, fraile carmelita: *Opinión copernicana y pitagórica del movimiento de la Tierra y el reposo del Sol*, 62-64
- fosforescencia, efecto de la, 197-198
- fotoeléctrico, efecto, 183, 185, 189-190, 220
- fotografía, 197-198
- fotones, 190, 221, 225-226
- Foucault, Jean-Bertrand-Léon, 156-172, 158, 196; cálculo de la velocidad de la luz, 160-161, 162; giróscopo de, 169-170, 171, 172; y la microscopía médica, 157; obtención de daguerrotipos, 158-159; péndulo de, 156, 163-169, 167; reguladores de los arcos eléctricos, 159-160, 172
- Franklin, Benjamin, físico y político, 122, 174
- Galilei, Livia, hija de Galileo, 52, 57, 65
- Galilei, Vincenzo, hijo menor de Galileo, 52, 57, 68
- Galilei, Vincenzo, padre de Galileo, 47-48, 51, 78, 84, 121
- Galilei, Virginia, hija de Galileo, 52, 57, 65, 75
- Galileo Galilei, 11, 16, 31, 47-82, 50, 81, 83-84, 94, 104, 109, 131, 142, 162; acusado de herejía, 62, 71-73; clases de movimiento según, 78-80; concepto de vector, 80; condenado por la Inquisición, 74; críticas a Aristóteles, 47-49, 51, 69, 77, 79, 87; descubrimientos astronómicos, 55-56; estudio de Arquímedes, 52; experimento de la torre de Pisa, 50-51, 76, 79, 105-106; hijos de, 52, 57, 75; magnetismo, estudios del, 54; mareas, estudios de las, 53, 58, 63, 68, 163; supernova, explosión de una, 54; fabricación de telescopios, 55, 56, 91, 172; invención del sector, 53; manchas solares, descubrimiento de las, 55, 60-61; medición del tiempo según, 77-78; plano inclinado de, 79-82; uso limitado de las matemáticas, 79, 84; valor de la aceleración g , 112; *De motu*, 49; *Diálogos*, 68, 70-71, 72, 74; *Discurso de dos ciencias nuevas*, 74-75; *Historia y demostraciones de las manchas solares y sus propiedades*, 61; *Sidereus Nuncius*, 56
- Gamba, Marina, mujer de Galileo, 52, 57
- gases: composición de los, 123; conductividad de los, 176, 179, 196
- Gauss, Karl Friedrich, 16
- Geiger, Hans, 202-204; en el descubrimiento del núcleo atómico, 204, 204-207; contador, 238
- Gelón, hijo de Hierón, 19
- giroscopio, 169-170, 171
- Giuducci, Mario, discípulo de Galileo, 65; *Discurso sobre los cometas*, 65
- Grassi, Orazio, jesuita, 65; *El balance astronómico*, 65-66

- gravidad terrestre, fuerza de la, 24, 207-208
- gravitación universal G , constante de, 129, 129-135, 134
- gravitación universal, ley de la, 89, 105, 112, 130
- Gray, lady Anne, madre de Cavendish, 121
- Greenwich, meridiano de, 36, 37
- Gregorio XV, papa, 66
- Gregory, James, profesor de matemáticas, 92
- Grimaldi, padre, 148
- Guillermo de Orange, rey de Inglaterra, Escocia e Irlanda, 114
- Haber, Fritz, químico, 211
- Halley, Edmond, astrónomo, 108-109, 111-112, 120; ley de cuadrado inverso a la distancia, 109-113
- Hannah, madre de Newton, 84-87, 89, 96
- Heisenberg, Werner, 228, 231; principio de indeterminación de, 224-227, 235, 241
- Hertz, Heinrich, físico, 195
- hidrostática, principio fundamental de la, 11, 15, 21-28 26, 28
- Hierón II, rey de Siracusa, 17; corona de, y el principio de la hidrostática, 15, 21-22
- Hirtius, cronista, 39
- Hitler, Adolf, 189, 211
- Hooke, Robert, 92-93, 113; microscopio de, 92, 93; y la descomposición de la luz, 95, 96; *Micrographia*, 92
- Hugo, Victor, 156
- Huxley, Aldous: *Contrapunto*, 127
- Huygens, Christiaan, 98, 142, 145-146; rivalidad con Newton, 104; *Tratado sobre la luz*, 142
- Iglesia católica, 57
- indeterminación, principio de, 224-227, 225, 235
- inercia de Newton, ley de la, 164
- Inquisición, denuncia de Galileo ante la, 59, 62-64, 71-73; Congregación del Índice, 64
- interferencias, en la propagación de las ondas, 146-149, 149, 159; patrones de, 215, 240
- Investigación y ciencia*, revista, 130
- Isabel la Católica, reina, 33
- Jacobo II, rey de Inglaterra, Escocia e Irlanda, 113
- jeroglíficos, escritura de los, 151
- Joliot, Frédéric, físico, 199
- Joliot-Curie, Irène, física, 199
- Jönsson, Claus, 243
- Journal de Débats, Le*, 159
- Juan Pablo II, papa, y el estudio del caso de Galileo, 76
- Júpiter, cuatro lunas de, 55-56, 70
- Kepler, Johannes, 16, 31, 56, 69, 83, 87, 160; leyes empíricas sobre las órbitas de los planetas, 69, 109-110
- Kikuchi, barón, ministro de Educación de Japón, 202
- Kircher, Athanasius, jesuita, 152
- Kleomedes: *De motu circulari*, 40
- Langévin, Paul, 222
- Laplace, Pierre-Simon, 160
- Laue, Max von, físico, 230

- LeVerrier, director del Observatorio de París, 159, 172
- Leibniz, Gottfried Wilhelm, 105, 108, 111
- Lenin, Vladimir Ilich Ulianov, 175, 181-182, 239; *Materialismo y empirio-criticismo*, 182
- Lense-Thirring, efecto, 170
- Leopoldo de Austria, archiduque, 65
- Leucipo, 140, 142
- Lorini, Niccolò, padre dominico, 62
- Lozano y Ponce de León, Eduardo, físico, 173-174
- Lucrecio: *Sobre la naturaleza del universo*, 210
- Luis Felipe, rey de Francia, 155
- luminiscencias, fenómenos naturales, 197
- Luna, estudio de la, 55
- luz: carácter ondulatorio de la, 142-145, 150, 190, 214, 215; descomposición de la, 93-98, 95, 97; y radiación, 140-141; teoría corpuscular de la, 161, 185, 190, 214; velocidad de la, 140-141, 160-161, 184
- luz del Sol, descomposición de la, 93-95, 95
- MacDonald, sir William, 199
- Mach, Ernst, físico fenomenólogo, 170
- Maelcote, Odo van, 59
- magnetismo, 173
- Marco Antonio, 39, 151
- Marconi, Giuliano, 195-196
- mareas, estudios de las, 53, 58, 63, 68, 163
- Marsden, estudiante colaborador de Rutherford y Geiger, 205-207
- matemática árabe, 30
- matemáticas: Einstein y las, 84; Newton como mejor matemático del mundo, 88, 114; uso limitado de Galileo, 79, 84
- materia, relación entre radiación y, 219-220
- Maxwell, James Clerk, 16, 83-84, 123, 173
- Mazzoleni, Marco Antonio, artesano, 53
- McLaurin, James, 196
- mecánica, 194
- mecánica cuántica, 208, 213, 218, 228, 230-231, 239
- Michelson, Albert, físico, 161; y la inexistencia del éter, 184; y la velocidad de la luz en el vacío, 184
- microfotografía médica, 159
- microscopio, invención del, 68; de Hooke, 92, 93
- Millikan, Robert Andrews, 182-184, 191; medición de la unidad de carga eléctrica, 183-188, 188, 190, 207; polarización de la luz, 183
- Montague, Charles, ministro británico de Finanzas, 118-119
- Monte, Guidobaldo del, marqués, 49
- Moore, Walter, historiador, 233
- Morley, Edward, físico, 161
- Moseley, Harry, estudiante de Rutherford, 208-209
- movimiento, clases de, 78-80
- Napoleón I, emperador, 152, 155-156
- Napoleón III, emperador, 156, 160, 166, 170-171
- Nelson, Horatio, almirante, 152
- neutrones, descubrimiento de los, 208
- Newton, Humphrey, ayudante de Isaac Newton, 115

- Newton, Isaac, 16, 31, 83-120, 116, 148, 160, 193, 211, 226; cálculo infinitesimal o fluxiones de, 89, 105-108, 111; como alquimista, 114-115, 123; como mejor matemático del mundo, 88, 114; descomposición de la luz del Sol, 93-98, 95, 97, 144, 190; director de la Casa de la Moneda, 118; disputas con Hooke, 92-93, 95, 104; en la Universidad de Cambridge, 87-90; esquizofrenia de, 88; estudio de la teología, 115; explicación del arco iris, 99, 101, 102; ley de la gravitación universal de, 89, 112, 130-133; ley de la inercia, 164; presidente de la Royal Society, 119; rivalidad con Huygens, 104; telescopio de, 91, 91, 172; teoría del color, 89, 142; *Artículos matemáticos*, 88; *De motu corporum in gyrum*, 109-110; *Opticks*, 99, 101; *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 94, 110, 111-113, 120
- Newton, Mary, esposa de Rutherford, 195, 200, 210, 212
- Niccolini, embajador toscano en Roma, 74
- Niépce, Nicéphore, inventor de los daguerrotipos, 157
- nuclear, reacción, 209, 209-210, 212
- núcleo atómico, descubrimiento del, 205-207, 206
- Observatorio de París, 159-160, 165, 172
- Octavio, emperador, 151
- Ohm, Georg Simon, físico, 123
- Omar, califa de Damasco, 39-40
- onda: amplitud de, 143, 144; frecuencia de, 144; longitud de, 143-144, 144, 224, 225; velocidad de, 144, 144
- ondas circulares, 143, 143, 146
- ondas piloto, 221-222, 222
- óptica, 194
- óptica geométrica, leyes de, 16
- Orsini, cardenal, 63
- palanca de Arquímedes, 16, 20
- Park, David: *The Fire Within the Eye*, 141-142
- partículas alfa, 203-205
- Pauli, Wolfgang, 228
- Paulo V, papa, 58, 63-64, 66
- péndulo, movimiento del, 53
- péndulo de Foucault, 156, 163-169, 167
- Pera, Cristóbal, editor, 11
- peso, concepto de, 131
- Physics World*, revista, 9
- pi (π), valor del número, 18-19
- piedra Rosetta, hallazgo de la, 152-153
- Pisa, torre de, 50-51, 76, 79, 105-106
- Planck, Max, físico, 185, 189, 228, 230; concepto de cuanto, 190, 208, 219, 223; constante de, 190-191, 219-220, 227
- plano inclinado, estudios del, 79-82
- Platón, 17, 28, 88, 99, 239
- Plinio: *Historia natural*, 42
- Plutarco, 13
- polea múltiple o polipasto, 19-20, 20
- Pompeyo, 151
- Pope, Alexander, poeta, 83
- Porto da Silveira, J. F., 42
- Priestley, Joseph, 123
- prismas, uso de los, 93-97, 95, 97, 144
- protones, 214; en el núcleo atómico, 207-208
- Ptolomeo, 57

- Ptolomeo I, faraón, 151
 Ptolomeo Evergetes, 40
- quarks, 214
- radiación electromagnética, 201
 radiactividad, descubrimiento de la, 198-199, 200
 rayos alfa, 199, 201
 rayos beta, 199, 201
 rayos catódicos, 175-179, 176, 177, 180, 185, 214
 rayos gamma, 201
 rayos X, 178, 178, 185, 187, 197-198, 200
 reguladores de los arcos eléctricos, 159-160, 172
 relatividad, teoría de la: especial, 184; general, 161, 170
 reloj de péndulo, 77
 Renacimiento, 17
 rendija doble, experimento de la, 146-147, 147, 213-218, 228, 232, 239-243, 239, 240, 242
 Ribera, José de, pintor: *Arquímedes*, 13, 14
 Ricci, Ostilio, matemático, 48
 Roentgen, Wilhelm: descubrimiento de los rayos X, 178
 Royal Society de Londres, 92-94, 96, 108, 112, 118-119, 122, 125, 145-146, 171
 Rutherford, Ernest, 193-212, 195, 204, 235; descubrimiento del núcleo atómico, 205-208, 223, 206; escudo de armas al nombrarlo barón, 210, 211; invención de la base de la telegrafía sin hilos, 195; invento del detector de humos, 202; modelo planetario, 208; primera reacción nuclear, 209, 209-210, 212
 Ryff, Walter: *Arquímedes en la bañera*, 15
- Sacy, Silvestre de, 153
 Sagredo, Francesco, amigo de Galileo, 53, 71
 Salviati, Filippo, amigo de Galileo, 71
 Santorio, médico, 53
 Saturno, anillo de, 55
 Scheiner, Christoph, jesuita tedesco, 58; *Tres cartas sobre las manchas solares*, 60
 Schrödinger, Erwin, físico, 224, 228-229, 232; ecuación de ondas, 231-234, 236, 240; gato de, 11, 237, 237-238, 242; *¿Qué es la vida?*, 231
 Schrödinger, Rudolf, 228
 Schuster, profesor de la Universidad de Manchester, 202
 Schwarzschild, Karl, astrónomo, 209
 Science Citation Index, 31
 sector, invención del, 53
 Serway, R. A.: *Física para ciencias e ingeniería*, 129, 133
 sistema sexagesimal de los babilonios, 18
 Smith, reverendo Barnabas, padrastro de Newton, 85
 Soddy, Frederick, colaborador de Rutherford, 201
 Sol: estudio de las manchas del, 55, 58, 60-61; véase también luz del Sol, descomposición de la
 sonido, propagación del, 143
 Stokes, John, director de la escuela de Grantham, 86-87
 Stoney, G. Johnstone, 180
 supernova, explosión de una, 54-55

- Swift, Jonathan, escritor, 119
 Symmer, hipótesis de, 174
- Tales de Mileto, 174
 telegrafía sin hilos, 195
 telescopio, fabricación de, 55; de Newton, 91, 91
 Teodorico, dominico, 101, 103
 Teodosio, emperador, 40
 Teófilo, patriarca de Alejandría, 39-40
 termodinámica, 194
 Tesla, Nikola, 195
 Thomson, Joseph John, físico, 211; descubrimiento del electrón, 179, 181, 185, 194, 196, 205
 tiempo, medición del, 77
 Tierra: datación del límite inferior de la edad de la, 201; equinoccios de la, 34, 35; medición de la circunferencia de la, 33, 41-45, 43, 44; masa de la, 131-132; movimiento de la, 33-34, 35; paralelos y meridianos de la, 35-36; radio de la, 131-132, 133; rotación de la, 162-163; solsticios de la, 34-36, 38;
Titanic, hundimiento del, 26
- Universidad de Cambridge, 84, 87-88, 89-90, 113-114, 117, 122, 199; laboratorio Cavendish de la, 194, 210
 Universidad de Chicago, 184-185
 Universidad de Columbia, 183
 Universidad de Florencia, 56
 Universidad de Manchester, 202, 208
 Universidad de Oxford, 173
 Universidad de Padua, 51
 Universidad de Pisa, 48, 51
 Universidad de Viena, 229
 uranio, descubrimiento del, 197-198
 Urbano VIII, papa (Maffeo Barberini), 60, 66, 67, 71-74
- velocidad, concepto de, 78
 Venus, fases de, 55, 57
 Vitrubio, arquitecto romano, 22
 Voltaire, François-Marie Arouet, 119; y la descomposición de la luz, 95, 95
- Watson, James, codescubridor de la estructura del ADN, 231
 Wilson, Robert, físico, reacciones nucleares de, 212
- Young, Thomas, 139, 145-146; esquema de interferencia, 150; experimento sobre el carácter ondulatorio de la luz, 146-150, 147, 153, 160, 213, 214, 220