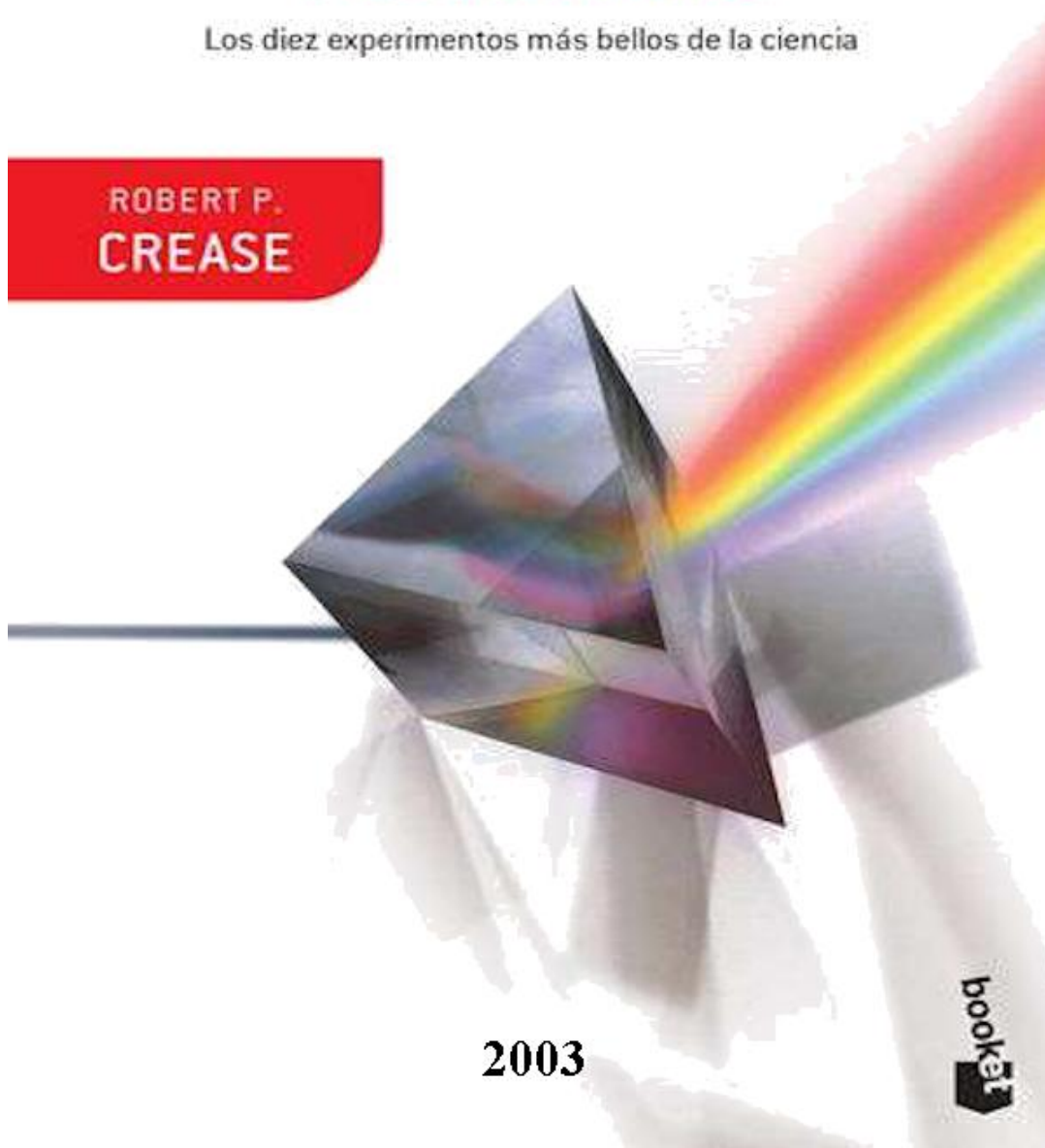


EL PRISMA Y EL PÉNDULO

Los diez experimentos más bellos de la ciencia

ROBERT P.
CREASE



Reseña

La ciencia es un delicado y complejo equilibrio entre lo experimental y lo teórico, entre las observaciones que realizamos y los sistemas lógico-simbólicos que construimos para relacionar todo aquello que medimos en la naturaleza.

No hay ciencia sin observaciones, sin experimentos. Y sin embargo, son las teorías, y los teóricos los que más atención y popularidad consiguen. Precisamente por esto son necesarios libros como el de Robert Crease, *El prisma y el péndulo*, en el que se presentan y explican con claridad y situándolos en su contexto científico e histórico, diez de los experimentos más importantes de la historia de la física; diez experimentos, además, bellos.

Van éstos desde el que empleó en el siglo III a. de C. Eratóstenes para medir la circunferencia de la Tierra, hasta los de interferencia cuántica de electrones que muestran con particular dramatismo la famosa dualidad onda-corpúsculo, pasando por otros como los que Galileo supuestamente realizó en la torre inclinada de Pisa, la descomposición de los rayos de luz en colores que Newton produjo con el sencillo recurso de un prisma, la puesta en evidencia de la rotación de la Tierra mediante un péndulo de Foucault, o los que diseñó Rutherford y que le sirvieron para demostrar que los átomos tenían una estructura “planetaria”.

Intercaladas entre los capítulos dedicados a estos experimentos, se encuentran unas exquisitas y apropiadas reflexiones de Crease que ayudarán a los lectores a comprender mejor qué es la ciencia.

Índice

Introducción.

1. La medida del mundo

Interludio

2. Que caiga la bola

Interludio

3. El experimento alfa

Interludio

4. Experimentum crucis

Interludio

5. El peso del mundo

Interludio

6. Luces y ondas

Interludio

7. Ver cómo gira la Tierra

Interludio

8. Ver el electrón

Interludio

9. El amanecer de la belleza

Interludio

10. El único misterio

Interludio

Conclusión

Agradecimientos

Índice de ilustraciones

[El autor](#)

Introducción

El momento de la transición

No recuerdo cuándo fue la primera vez que oí a un científico referirse a un experimento como algo «bello», pero sí recuerdo el momento en que comprendí de qué estaba hablando.

Ocurrió hace muchos años. Estaba sentado en un despacho mal iluminado del edificio de física de la Universidad de Harvard, rodeado de montones desordenados de libros y artículos. Frente a mí se encontraba Sheldon Glashow, un enérgico físico cuyos rasgos, e incluso sus gafas de culo de vaso, quedaban casi ocultos tras un velo enigmático de humo de puro. «Aquél sí que fue un experimento bello», me decía. «¡Un experimento absolutamente bello!». Algo en la intensidad y el énfasis que ponía en sus palabras me hizo comprender que las escogía con sumo cuidado. A sus ojos, el experimento que describía era, literalmente, una cosa bella.

Glashow es una persona cultivada. Como muchos científicos, sabe mucho más sobre arte y humanidades de lo que suelen saber los artistas y humanistas sobre el suyo: la física de alta energía. Es, además, un científico excepcional que en 1979, unos pocos años antes de nuestra conversación, había sido galardonado con el premio Nobel de física. En la ocasión a la que ahora me refiero, en su despacho, me vi forzado a considerar la posibilidad de que alguien pudiera realmente calificar de bello un experimento científico y que al hacerlo se refiriera a lo mismo a lo que nos referimos la mayoría de

nosotros cuando decimos que un paisaje, una persona o una pintura son bellos.

Sentí curiosidad por saber más del experimento que tanto había entusiasmado a Glashow y al que éste se había referido, en jerga científica, como el experimento de «las corrientes neutrales de SLAC». Se trataba de una empresa difícil y compleja que durante varios años había absorbido los esfuerzos de muchos científicos, ingenieros y técnicos. Tras casi una década dedicada a planificarlo y construirlo, el experimento se había realizado por fin en la primavera de 1978 en un acelerador de partículas de más de tres kilómetros de longitud perteneciente al Centro de Aceleradores Lineales de Stanford (o SLAC, en sus siglas en inglés), al sur de San Francisco, en las montañas de Santa Clara. El experimento consistía en crear electrones polarizados, es decir, electrones con el espín orientado en la misma dirección, y dispararlos después en el acelerador a una velocidad cercana a la de la luz para que chocaran contra un grupo de protones y neutrones y poder analizar entonces los resultados del impacto. Lo que estaba en juego era una nueva teoría global sobre la estructura de la materia en su nivel más fundamental, una teoría a cuyo desarrollo había contribuido Glashow de manera muy importante. Si la teoría era correcta, el experimento pondría de manifiesto una pequeña diferencia en el modo en el que los electrones rebotaban contra los protones que les servían de diana dependiendo de cuál fuera la polarización de los electrones, lo que implicaría la presencia de las llamadas «corrientes neutrales con violación de la paridad». La diferencia en cuestión era tan extraordinariamente

pequeña, de alrededor de uno de cada diez mil electrones, y para su observación se requería tanta precisión (para que el experimento fuera convincente, los científicos tenían que observar diez mil millones de electrones), que muchos científicos creían que el experimento era imposible o que sus resultados no serían concluyentes.

Pero a los pocos días del inicio del experimento ya era evidente que la respuesta no iba a ser en lo más mínimo ambigua o cuestionable y que la ambiciosa teoría era correcta. (Glashow y otros científicos recibirían el premio Nobel por su papel en la creación de esta teoría). Este experimento, ejecutado a la perfección, hizo que la existencia de una nueva característica fundamental de la naturaleza, las corrientes neutrales con violación de la paridad, resultara tan obvia para cualquier persona con formación en física que incluso quienes no participaron en el experimento lo encontraron emocionante. Cuando uno de los científicos que sí lo hizo describió por primera vez el trabajo experimental y sus resultados ante una audiencia de físicos en una charla celebrada en el auditorio del acelerador en junio de 1978, fue la primera ocasión en la memoria de todos los presentes en la que ninguno de los científicos de la audiencia, gente por lo general amiga de la crítica, puso en duda los resultados. De hecho, nadie hizo ninguna pregunta. Todos los presentes recuerdan también que el aplauso que siguió a la charla fue más largo, más apreciativo y más respetuoso de lo que era habitual¹.

¹ Para una explicación no técnica de este experimento véase Robert P. Crease y Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Rutgers University Press, New Brunswick, N.J., 1996, pp. 386-390.

La idea de que los experimentos pudieran ser bellos me hizo preguntarme qué otros podían incluirse en la lista. También hizo que me planteara preguntas que me intrigaban desde los dos polos de mi doble carrera como filósofo e historiador de la ciencia: ¿qué implica para los experimentos que puedan ser bellos? Y ¿qué implica para la belleza que los experimentos puedan poseerla?

Cuando hablo sobre la belleza de los experimentos con personas que no son científicos, éstas suelen mostrarse escépticas. Ello se debe a tres factores, según creo. Uno es social: cuando los científicos se presentan en público para informar sobre su trabajo de manera formal o para hablar con periodistas, casi nunca utilizan la palabra «belleza». La convención social dicta que los científicos deben presentarse como observadores objetivos de la naturaleza, restando importancia a lo subjetivo y lo personal. Para acomodarse a esta imagen, los científicos presentan los experimentos como algo puramente funcional, como una simple manipulación de un conjunto de instrumentos que de forma casi automática producen datos correctos.

Un segundo factor es cultural, y se deriva del modo en que la ciencia se enseña en las escuelas. Los libros de texto utilizan los experimentos como vehículos para una lección, como apoyo para que los estudiantes adquieran un conocimiento profundo de un tema. Al ver los experimentos como obstáculos que hay que superar para aprobar el curso, no es raro que los estudiantes pasen por alto su belleza.

Un tercer factor es el prejuicio filosófico de que la auténtica belleza sólo puede encontrarse en lo abstracto. «Sólo Euclides ha visto la belleza desnuda», declaró la poetisa Edna St. Vincent Millay. Por esta razón, las discusiones sobre la belleza en la ciencia suelen centrarse en su papel en las teorías y las explicaciones. Son las abstracciones, como las ecuaciones, los modelos y las teorías, las que poseen simplicidad, claridad, penetración, profundidad, atemporalidad y otras propiedades que tendemos a asociar con la belleza. Los experimentos, que inevitablemente implican manipular máquinas, instrumentos, sustancias químicas y organismos, no parecen ajustarse a esta definición.

Los científicos experimentales saben muy bien que, en el laboratorio, los experimentos significan sobre todo trabajo tedioso. La mayor parte del tiempo de un científico se consume en calibrar, preparar, diseñar, refinar, resolver problemas técnicos y buscar financiación y apoyo. Buena parte de la ciencia consiste en incrementar de forma gradual lo que ya sabemos y podemos hacer, pero de vez en cuando se produce de forma impredecible pero inevitable un suceso que hace que cristalice una nueva idea, que adopte una forma nueva nuestra percepción de las cosas. Nos saca de un estado de confusión para mostrarnos, de forma directa e incuestionable, lo que es importante, transformando nuestras ideas sobre la naturaleza. Los científicos tienden a calificar esos momentos de «bellos».

La palabra se cuela en las charlas, los mensajes, las cartas, las entrevistas, los libros de notas y lugares por el estilo. «¡Qué belleza! ¡Hay que publicarlo!», escribió el premio Nobel de física Robert

Millikan en una página de su cuaderno de laboratorio en 1912; y, sin embargo, no utilizó la palabra «belleza» en el artículo científico que publicó posteriormente. Cuando James Watson vio por primera vez, a principios de 1953, la hoy célebre fotografía de Rosalind Franklin de la molécula del ADN, la describió como «una hélice sencillamente bella», y en el primer borrador del famoso artículo que sobre el descubrimiento del ADN escribió con Francis Crick se refirió a la «bellísima» obra de Franklin y otros científicos del King's College. Sin embargo, a instancias de sus colaboradores eliminó esta frase de la versión final. En los momentos espontáneos e improvisados, los científicos utilizan la palabra «bello» para referirse a resultados, técnicas, instrumentos, ecuaciones, teorías y, lo que es aún más curioso, a los motores del progreso científico, los experimentos.²

Cuando los científicos hablan de belleza en estos contextos, por lo general utilizan la palabra de forma vaga, ambigua y en ocasiones incluso contradictoria. No se les puede culpar por ello; ¿acaso hay algo más difícil de analizar con precisión? Victor Weisskopf, uno de los grandes físicos del siglo XX, señaló en 1980 que «lo bello en la ciencia es lo mismo que lo bello en Beethoven». Pero apenas unos años más tarde escribió que «por lo general, lo que se califica de “bello” en la ciencia tiene poco que ver con la belleza que experimentamos en el arte³». Weisskopf intuía semejanzas y

² Comentario de Watson: Victor McElheny, *Watson and DNA: Making a Scientific Revolution*, Perseus, Cambridge, Massachusetts, 2003, p. 52. Sobre los comentarios de Millikan, véase el capítulo ocho.

³ La primera cita de Weisskopf está extraída de K. C. Cole, *The Universe and the Teacup: The Mathematics of Truth and Beauty*, Harcourt Brace, Nueva York, 1998, p. 184 (la fecha corresponde a una comunicación personal). (Hay trad. cast.: *El universo y la taza de té: las*

diferencias entre la belleza en la ciencia y la belleza en el arte, pero no conseguía articular esa diferencia de una forma coherente.

Otros científicos han ahondado más en esta cuestión. Uno de ellos es el matemático británico G. H. Hardy, quien, en su maravilloso libro Apología de un matemático, califica de bellas a varias pruebas matemáticas y defiende su afirmación. Hardy propone que los criterios esenciales para definir la belleza en su campo son la cualidad de inesperado, la inevitabilidad y la economía, además de la profundidad, la medida en que una prueba es fundamental. Por eso, dice Hardy, puede calificarse de bella una prueba matemática pero no un problema de ajedrez. La solución a un problema de ajedrez no puede cambiar las reglas del juego, mientras que una nueva demostración matemática puede alterar las propias matemáticas⁴.

El físico británico del siglo XIX Michael Faraday era célebre por las conferencias públicas que impartía en la Real Institución de Londres. Una de las más populares fue la que versó sobre la «historia química de la vela». Al principio de su charla, Faraday calificaba las candelas de «bellas», y explicaba que no se refería a lo bonito de su color o su forma; de hecho, a Faraday no le gustaban las velas ornamentales y llamativas. A su entender, la belleza se refiere «no a las cosas de

matemáticas de la verdad y la belleza, Ediciones B, Barcelona 1999). La segunda cita de Weisskopf es de V. Stefan (ed.), *Physics and Society: Essays in Honor of Victor Frederick Weisskopf by the International Community of Physicists*, Springer, Nueva York, 1998, p. 41.

⁴ G. H. Hardy, *A Mathematician's Apology*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1992, secciones 10-18. (Hay trad. cast.: *Apología de un matemático*, Nivola Libros y Ediciones, Tres Cantos, 1999). Sobre la belleza de las ecuaciones, véase G. Farnelo (ed.), *It Must Be Beautiful: Great Equations of Modern Science*, Granta Books, Londres, 2003. (Hay trad. cast.: *Fórmulas elegantes: grandes ecuaciones de la ciencia moderna*, Tusquets Editores, Barcelona, 2004).

mejor apariencia, sino a las que mejor funcionan». A sus ojos, una candela es bella porque su funcionamiento elegante y eficaz descansa sobre un gran número de leyes universales. El calor de la llama funde la cera y al mismo tiempo genera corrientes de aire ascendentes que enfrían la cera en los márgenes, creando de este modo una cavidad que recoge la cera fundida. Ésta se mantiene horizontal gracias a «la misma fuerza de la gravedad que mantiene unidos los mundos». La fuerza capilar hace que la cera fundida ascienda por la mecha desde la cavidad de la que emerge ésta hasta la llama que arde en su punta, mientras que el calor de la llama desencadena una reacción química en la cera que mantiene encendida la llama. La belleza de la candela, decía Faraday, descansa en el complejo juego de principios científicos de que depende y en la economía con la que los entreteje⁵.

Pero ¿qué decir de la belleza de un experimento? A diferencia de una pintura o una escultura, un experimento es dinámico. Se parece más a una representación de teatro, puesto que es algo que se planifica, escenifica y observa con el fin de producir algo que resulte realmente interesante. ¿Cómo podemos medir la circunferencia de la Tierra sin rodearla por el ecuador con una cinta métrica? ¿Cómo podemos determinar si la Tierra gira sobre su eje sin necesidad de salir al espacio exterior para observarla? ¿Cómo podemos averiguar lo que hay en el interior de un átomo sin verlo? Mediante una cuidadosa escenificación de un evento en el laboratorio, en ocasiones con objetos

⁵ Michael Faraday, *The Chemical History of a Candle*, Viking, Nueva York, 1963, Conferencia 1. (Hay trad. cast.: *La historia química de una vela*, Nivola Libros y Ediciones, Tres Cantos, 2004).

tan sencillos como prismas o péndulos, logramos que las respuestas se manifiesten ante nuestra mirada atenta. Del caos emerge la forma, y no por magia como el conejo que el prestidigitador extrae de su sombrero, sino gracias a eventos que nosotros mismos orquestamos. Hacemos que los misterios del mundo hablen⁶.

La belleza de un experimento reside en cómo logra que sus elementos hablen. La comparación que propone Hardy entre una prueba matemática y un problema de ajedrez sugiere que un experimento es bello cuando nos revela algo tan profundo que transforma nuestra comprensión del mundo. La evocación de la belleza de la vela en la charla de Faraday sugiere que los elementos de un experimento tienen que disponerse de manera eficaz. Y tanto Hardy como Faraday sugieren que un experimento bello tiene que ser definitivo y revelar sus resultados sin necesidad de mayores generalizaciones o inferencias. Cuando un experimento bello plantea preguntas, éstas tratan más del mundo que del propio experimento.

Cada uno de estos tres elementos de la belleza (profundidad, eficacia y carácter definitivo) aparece en las disquisiciones formales y sistemáticas de la belleza que nos han ido proporcionando a lo largo de los siglos filósofos y artistas. Algunos, de Platón a Heidegger, hacen hincapié en cómo las cosas bellas apuntan, más allá de sí mismas, a lo bello y lo bueno; es la irrupción de lo uno en lo múltiple,

⁶ Es totalmente irrelevante que interpretemos este proceso como que el mundo nos habla, de acuerdo con la visión clásica, o que nos hablan las propias palabras que proyectamos y que vuelven a nosotros, como quieren los constructivistas sociales. Lo esencial es que la experimentación es un evento generador de significado que es más complejo de lo que son capaces de representar estas dos interpretaciones. Véase Robert P. Crease, «Hermeneutics and the Natural Sciences: Introduction», en Robert P. Crease (ed.), *Hermeneutics and the Natural Sciences*, Kluwer, Dordrecht, 1997, pp. 259-270.

de lo infinito en lo finito, de lo divino en lo mundano. Otros, como Aristóteles, se fijan más en la composición del objeto bello, resaltando el papel de la simetría o la armonía, el hecho de que cada uno de sus elementos aporta algo esencial. Por último, otros, como David Hume e Immanuel Kant, ponen el énfasis en el tipo concreto de satisfacción que los objetos bellos suscitan en nosotros. A veces no nos damos cuenta de cuáles son nuestras expectativas hasta que éstas se realizan, pero los objetos bellos nos hacen comprenderlo: «¡Eso es lo que realmente quería!». Que los experimentos puedan poseer estas propiedades sugiere que en efecto podemos calificarlos de «bellos», y no de manera metafórica, forzando el significado estricto del término, sino con toda legitimidad, en el sentido tradicional y enjundioso de la palabra.

En Inocentes en el extranjero, Mark Twain relata su visita al baptisterio del Duomo de Pisa, donde le mostraron la famosa lámpara oscilante que según la leyenda había inspirado al joven Galileo, entonces con diecisiete años, a medir su pulso y a descubrir, en un experimento simple e improvisado, que la oscilación del péndulo es isócrona, es decir, que tarda el mismo tiempo en ir y venir con independencia de la distancia recorrida. (La isocronía del péndulo es, como Twain bien sabía, el principio en el que se basan la mayoría de los relojes mecánicos). A Twain el péndulo le pareció tan patricio como plebeyo; mirándolo, se maravilló de aquel descubrimiento de Galileo, que había permitido a la humanidad contar las horas, y experimentó con ello una reencontrada cercanía con el mundo:

Parecía insignificante para haber concedido al mundo de la ciencia y la mecánica una extensión tan grande de sus dominios. Reflexionando ante su sugerente presencia me parecía ver un universo demente de discos oscilantes, la esforzada prole de este sereno progenitor. Parecía tener una expresión inteligente, como si supiera que no era una lámpara sino un péndulo; un péndulo disfrazado, por razones prodigiosas e inescrutables concebidas por él mismo; pero no un péndulo corriente, sino el péndulo original, el viejo péndulo patriarcal, el Abraham de los péndulos del mundo⁷.

En el estilo inimitable, las observaciones de Mark Twain ilustran la belleza que puede poseer incluso el más rudimentario de los experimentos científicos si revela algo profundo sobre el mundo, si nos lo muestra de una forma simple y directa, si lo hace de tal manera que satisface sin necesidad de más demostraciones.

La oscilación de una lámpara, los rayos de luz al atravesar una serie de prismas, la lenta progresión del plano de oscilación de un péndulo formando un círculo, el descenso casi simultáneo de objetos de distinto peso dejados caer al mismo tiempo, los cocientes entre las velocidades de gotitas de aceite; todos estos sucesos, escenificados de la forma apropiada, pueden revelarnos algo sobre sí mismos y sobre el mundo. Son a un tiempo como pinturas de paisajes, que nos complacen, inspiran e iluminan, y como mapas, que nos guían al adentrarnos un poco más en el mundo. Un experimento marca un

⁷ Mark Twain, *The Innocents Abroad, Literary Classics of the United States*, Nueva York, 1984, pp. 196-197. (Hay trad. cast.: *Inocentes en el extranjero*, Ediciones del Azar, Barcelona, 2001).

umbral. Quizá utilice objetos simples y corrientes, pero éstos sirven de puente hacia un territorio de significación y trascendencia. La belleza nos lleva al mundo de las ideas pero al mismo tiempo nos mantiene anclados en el mundo de los sentidos, como decía con insistencia el filósofo y poeta alemán Friedrich Schiller. Y el ensayista estadounidense Ralph Waldo Emerson escribió que «la belleza es el momento de la transición, como si la forma estuviera lista para fluir hacia otras formas⁸».

La belleza de los experimentos puede adoptar muchas formas, del mismo modo que es distinta la belleza de una pieza de Bach que la de una de Stravinsky. Unos poseen una belleza sinóptica y unen varias leyes universales, mientras que otros tienen la belleza de la amplitud y enlazan elementos que se manifiestan a escalas muy dispares. Algunos tienen una belleza austera y nos atraen con la desnuda simplicidad con que revelan la forma pura; otros son sublimes y nos inspiran al sugerirnos el aterrador, ilimitado y, en último término, incomprensible poder de la naturaleza.

Puede concebirse este libro como una suerte de galería que alberga objetos de rara belleza, cada uno con su propio diseño, sus propios materiales y su atractivo único. A nadie le gustará todo del mismo modo. La formación, experiencia, educación y gusto particular llevarán a cada uno a preferir unos objetos a otros.

⁸ Schiller desarrolla en profundidad su idea de la belleza en su libro *On the Aesthetic Education of Man*. (Hay trad. cast.: *Kallias: Cartas sobre la educación estética del hombre*, Anthropos, Rubí, 1990). *Ralph Waldo Emerson, Essays & Poems, Literary Classics of the United States*, Nueva York, 1996, p. 931. (Hay trad. cast.: *Ensayos*, Espasa Calpe, Pozuelo de Alarcón, 2001).

Una de las tareas más difíciles a la hora de montar una galería es la elección de lo que debe contener. Resolví este problema del modo siguiente. En 2002, incitado por otro científico que también hablaba de la belleza de un experimento y recordando no sólo el comentario de Glashow sino también muchos otros que había escuchado a lo largo de los años, decidí realizar una encuesta. Pregunté a los lectores de Physics World, donde escribo una columna, cuáles eran, en su opinión, los experimentos más bellos. Para mi sorpresa, mis lectores me enviaron más de trescientos candidatos que iban desde experimentos históricos hasta experimentos conceptuales, experimentos propuestos, demostraciones, teoremas y modelos. Abarcaban todos los campos científicos, desde la física a la psicología. Varias bitácoras y foros de discusión continuaron mi encuesta en Internet, proporcionándome cientos de candidatos. Para compilar mi lista de los experimentos más bellos de la ciencia, decidí escoger los diez candidatos citados con mayor frecuencia⁹. Algunos objetarán que en la lista predominan los experimentos de física. Es cierto que mi columna original de Physics World pedía a los lectores que nombraran los experimentos más bellos de la física; con todo, me siento justificado al afirmar que esta galería de retratos históricos contiene los diez experimentos más bellos de la ciencia. Ello se debe a que, en realidad, la gran mayoría de quienes respondieron a la encuesta, tanto en Physics World como en otros foros, interpretaron que mi encuesta se refería a los experimentos científicos en general.

⁹ Robert P. Crease, «The Most Beautiful Experiment», *Physics World*, mayo de 2002, p. 17; Robert P. Crease, «The Most Beautiful Experiment», *Physics World*, septiembre de 2002, pp. 19-20.

Incluso los lectores de Physics World propusieron experimentos que abarcaban la química, la ingeniería y la psicología.

Además, más de la mitad de los experimentos de la lista se realizaron por primera vez cuando la física todavía no constituía una rama de la ciencia separada del resto. Por último, se trata en todos los casos de ejercicios clásicos de los libros de texto que se discuten y realizan con frecuencia en cursos básicos de ciencia y son ya emblemáticos de la ciencia en el sentido más amplio. Por eso mismo, no debe extrañar que aparezcan alusiones y descripciones de estos históricos y dramáticos experimentos en la obra de artistas tan dispares como el dramaturgo Tom Stoppard, el músico Philip Glass y el novelista Umberto Eco, y que con frecuencia se manifiesten en la cultura popular¹⁰.

He decidido ordenar estos experimentos por orden cronológico. Logro así transmitir una fuerte sensación de la vastedad de la empresa que

¹⁰ El experimento de Eratóstenes forma parte del programa de estudios de muchas asignaturas de física de secundaria, fue comentado por Carl Sagan en su popular serie *Cosmos* y es el tema de un libro para niños. El experimento de la torre inclinada de Pisa, de Galileo, es casi tan legendario como (para los lectores estadounidenses) la historia de George Washington y el cerezo, y fue reproducido sobre la superficie de la Luna por la tripulación del *Apolo 15*. El experimento del plano inclinado de Galileo se enseña en muchas clases de ciencia y aparece en una escena de una ópera de Philip Glass, *Galileo Galilei*. El significado de los experimentos con prismas de Isaac Newton fue debatido acaloradamente por escritores y poetas durante los siglos XVIII y XIX. El péndulo de Foucault tiene un marchamo de legitimidad cultural gracias a estar presente en muchas instituciones públicas, entre ellas el edificio de las Naciones Unidas en Nueva York, y a que es un elemento central de al menos dos novelas, una de las cuales es el *best-seller* de Umberto Eco titulado precisamente *El péndulo de Foucault*. Dos de estos experimentos (el de las gotas de aceite de Millikan y el descubrimiento del núcleo atómico por Rutherford) han sido el tema central de artículos de la historia de la ciencia controvertidos y de gran influencia. Dos equipos independientes que han realizado el experimento de la doble rendija que ilustra la interferencia cuántica de electrones han hecho sobre su experimento videos impresionantes y ampliamente distribuidos. La obra de teatro de Tom Stoppard *Hapgood* incluye una discusión de este experimento y del original de Young con la luz. Y así, tantas otras referencias.

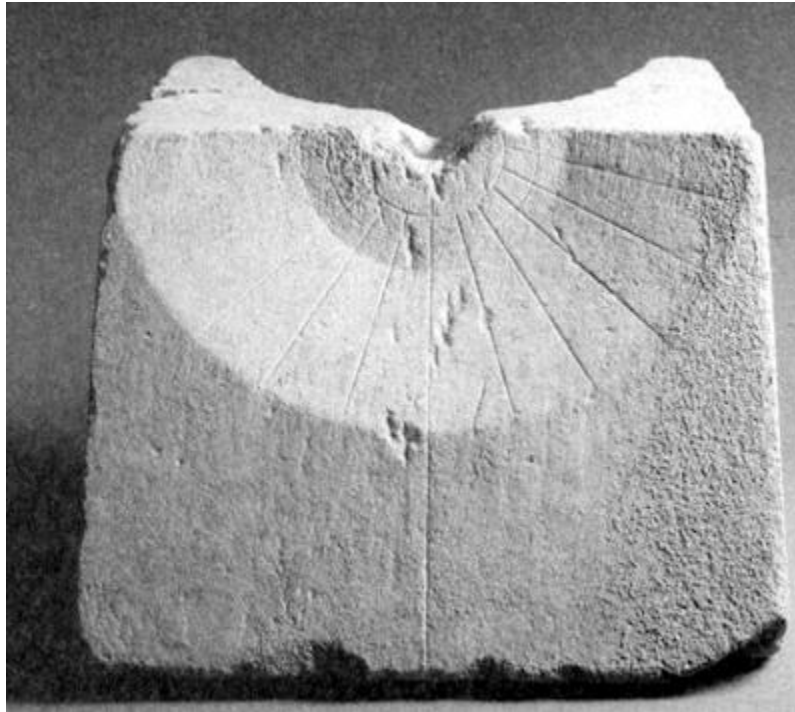
la ciencia inició hace casi 2.500 años. La lista nos lleva desde los tiempos en los que los problemas más apremiantes incluían la estimación, aunque fuera aproximada, de las propiedades básicas de la Tierra hasta la era en la que los científicos comenzaron a realizar mediciones precisas de las propiedades de los átomos y de sus partículas constituyentes. Nos transporta desde un tiempo de herramientas simples y caseras, como los relojes de sol y los planos inclinados, hasta la época de la instrumentación avanzada. Desde los tiempos en que los científicos trabajaban solos (o como mucho con uno o dos ayudantes) hasta el presente, cuando los científicos a menudo trabajan en equipos formados por cientos de personas. Nos deja vislumbrar la personalidad y el pensamiento creativo de algunas de las figuras más interesantes del campo. Aparecen aquí muchos de los experimentos que fueron hitos en la evolución de la ciencia: el experimento de Galileo con los planos inclinados estableció por vez primera la fórmula matemática del movimiento acelerado; el experimentum crucis de Isaac Newton desveló la naturaleza de la luz y los colores; el experimento de la doble rendija de Thomas Young reveló el carácter ondulatorio de la luz; y el descubrimiento por Ernest Rutherford del núcleo atómico inauguró la era nuclear. Esta lista contiene experimentos que ilustraron poderosamente o que ayudaron a motivar algunos de los grandes cambios de paradigma de la historia de la ciencia, desde el cambio de la perspectiva aristotélica sobre el movimiento a la galileana, de la concepción corpuscular de la luz a la ondulatoria y de la mecánica clásica a la cuántica.

Con una sola excepción, estos experimentos fueron preferidos por un número aproximadamente igual de personas, de modo que no los ordeno por este criterio. La excepción, el experimento de la doble rendija que ilustra la interferencia cuántica en electrones individuales, fue con diferencia el candidato más votado como experimento más bello de la ciencia. Inevitablemente, habrá críticos que cuestionen mi lista. Pero estarán discutiendo sobre el proceso de selección y no sobre el tema de la galería: la belleza de los experimentos científicos.

Capítulo 1

La medida del mundo

Eratóstenes y la circunferencia de la Tierra



El reloj de sol o contador de horas más antiguo que conocemos. Es del siglo III a. C., en tiempos de Eratóstenes. Aunque casi intacto, falta el gnomon o indicador que proyectaba su sombra por el cuenco.

En el siglo III a. C. un académico griego llamado Eratóstenes (c. 276-c. 195 a. C.) realizó la primera medición conocida del tamaño de la Tierra. Sus herramientas eran simples: la sombra proyectada por el indicador de un reloj de sol y una serie de mediciones y suposiciones. Pero la medición fue tan ingeniosa que sería citada con autoridad durante cientos de años. Y tan sencilla e instructiva que, casi 2.500 años más tarde, la reproducen cada año escolares de todo el mundo. Se basa en un principio tan elegante que al

comprenderlo uno se siente impulsado a salir afuera y medir la longitud de una sombra.

El experimento de Eratóstenes combina dos ideas de enorme trascendencia. La primera era concebir el cosmos como un conjunto de objetos (la Tierra, el Sol, los planetas y las estrellas) dispuestos en el espacio corriente de tres dimensiones. Esto puede parecernos obvio hoy, pero no era una creencia común por aquel entonces. Una de las contribuciones de la Grecia clásica a la ciencia fue insistir en que tras la multitud de movimientos cambiantes del mundo y de la bóveda celeste se encuentra un orden impersonal e inmutable, una arquitectura cósmica que se puede describir y explicar con la ayuda de la geometría. La segunda idea consistía en realizar mediciones corrientes para comprender el ámbito y dimensiones de esta arquitectura cósmica. Al combinar estas dos concepciones, a Eratóstenes se le ocurrió la audaz idea de que las mismas técnicas que se aplicaban a la construcción de casas y puentes, a la ordenación de campos y carreteras y a la predicción de las inundaciones y los monzones podían proporcionarnos información sobre las dimensiones de la Tierra y otros cuerpos celestes.

Eratóstenes partió de la suposición de que la Tierra era aproximadamente esférica. Aunque hoy suele creerse que Colón pretendía demostrar con su viaje que el mundo no era plano, muchos de los griegos antiguos que habían reflexionado sobre el cosmos ya habían llegado a la conclusión de que la Tierra no sólo tenía que ser esférica, sino que además tenía que ser diminuta en comparación con el resto del universo. Así lo creía Aristóteles, quien

en su obra *Acerca del cielo*, escrita aproximadamente un siglo antes de Eratóstenes, proponía varios argumentos, algunos lógicos y otros empíricos, para explicar por qué la Tierra tenía que ser esférica. Aristóteles señalaba, por ejemplo, que durante los eclipses la sombra proyectada por la Tierra sobre la Luna siempre es curva, algo que sólo puede suceder si la Tierra es redonda. También se percató de que los viajeros ven estrellas distintas cuando van al norte o al sur (improbable si el mundo fuera plano), que ciertas estrellas visibles en Egipto y en Chipre no se ven en tierras más septentrionales mientras que otras estrellas que son siempre visibles en el norte salen y se ponen en el sur, como si se vieran en la lejanía desde la superficie de un objeto redondo. «Esto no sólo indica que la masa de la Tierra es de forma esférica», escribió Aristóteles, «sino también que, en comparación con las estrellas, no es de gran tamaño¹¹».

Nunca faltó de recursos, el pensador presentaba también otros argumentos más creativos. Gracias a los relatos de viajeros extranjeros y expediciones militares sabía que los elefantes se hallaban en tierras distantes tanto al este (África) como al oeste (Asia). Por lo tanto, decía, estas tierras probablemente se encuentren unidas, una conjetura ingeniosa pero incorrecta. Otros filósofos griegos propusieron argumentos adicionales a favor de la forma esférica de la Tierra, entre ellos la diferencia en el momento

¹¹ Aristóteles, *On the Heavens*, tr. J. L. Stocks, 298a. En *The Works of Aristotle*, Vol. 1, Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952. (Hay trad. cast.: *Acerca del cielo. Meteorológicos*, Gredos, Madrid, 1997).

de la salida y la puesta del Sol en distintos países o el hecho de que los barcos se pierden en el horizonte desde el casco hacia arriba.

Nada de esto, sin embargo, daba respuesta a una pregunta básica: ¿qué tamaño tiene esta Tierra redonda? ¿Acaso es posible llegar a conocer su tamaño sin necesidad de enviar topógrafos a recorrer toda su circunferencia?

De los tiempos anteriores a Eratóstenes no nos han llegado más que estimaciones del tamaño de la Tierra. De la más antigua nos informa Aristóteles, según el cual «los matemáticos que intentan calcular la circunferencia de la Tierra llegan a la cifra de 400.000 estadios», pero no nos dice ni sus fuentes ni sus razonamientos¹². Además, es imposible convertir esta cifra a unidades modernas con precisión. Un *estadio* corresponde a la longitud de un estadio de carreras griego, que variaba de una ciudad a otra. Con una estimación aproximada de la longitud del estadio, los investigadores actuales convierten la cifra que da Aristóteles en algo más de 64.000 kilómetros (el número real es de unos 40.000 kilómetros). Arquímedes, quien construyó modelos del cosmos en los que los cuerpos celestes rotaban unos alrededor de otros, propuso una estimación ligeramente menor que la de Aristóteles: 300.000 estadios, o algo más de 48.000 kilómetros. Pero tampoco él nos ha dejado pistas sobre sus fuentes o su razonamiento.

Aquí es donde entra Eratóstenes. Coetáneo de Arquímedes, aunque más joven, Eratóstenes nació en el norte de África y se educó en Atenas, llegando a ser erudito en muchas áreas, desde la crítica

¹² *Ibid.*

literaria y la poesía hasta la geografía y las matemáticas. No obstante, no era considerado un pensador de primer rango en ninguno de estos campos, lo que llevó a sus colegas a apodarlo, no sin sarcasmo, «Beta», la segunda letra del alfabeto griego, en referencia a que siempre se quedaba en segundo lugar. Pese a las burlas, su brillantez era tan renombrada que a mediados del siglo III a. C. el rey de Egipto lo invitó a que ejerciera de tutor de su hijo, y más tarde lo nombró director de la célebre biblioteca de Alejandría, la primera y mayor de las bibliotecas de su clase, que había sido establecida por la dinastía ptolemaica de Egipto como parte de sus planes para convertir a Alejandría en la capital cultural del mundo griego. La biblioteca se convirtió en un lugar de encuentro para estudiosos de todo el mundo y Alejandría se transformó en una importante encrucijada intelectual; albergó, por ejemplo, a Euclides y su escuela. En Alejandría, los bibliotecarios lograron acumular una amplísima colección de manuscritos sobre un gran abanico de temas, que cualquier persona con las credenciales académicas apropiadas podía utilizar. (La biblioteca de Alejandría fue también, hasta donde sabemos, la primera que catalogó los manuscritos por orden alfabético de autor).

Eratóstenes escribió dos libros de geografía que alcanzaron una especial importancia en el mundo antiguo. *Geographica*, en tres volúmenes, fue la primera obra que cartografió el mundo con la ayuda de paralelos (líneas paralelas al ecuador) y meridianos (líneas longitudinales que pasan por un punto dado y por los dos polos). Su *Medición del mundo* contiene la primera descripción conocida de un

método para medir el tamaño de la Tierra. Por desgracia, ambas obras se han perdido, de modo que nos vemos obligados a reconstruir los razonamientos de Eratóstenes a partir de los comentarios realizados por otros autores clásicos que lo conocieron¹³. Por fortuna, fueron muchos.

Eratóstenes razonaba que si la Tierra era un cuerpo pequeño y esférico situado dentro de un vasto universo, entonces otras partes, como el Sol, debían de encontrarse muy lejos —tan lejos, de hecho, que sus rayos debían de ser prácticamente paralelos en todos los lugares de la Tierra. También sabía que a medida que el Sol ascendía por el cielo las sombras se iban haciendo más cortas—, y sabía, gracias a los relatos de viajeros, que durante el solsticio de verano en la ciudad de Siena (la actual Asuán), el Sol se situaba justo encima de la cabeza de modo que las sombras desaparecían de cualquier objeto vertical, como las columnas, los postes e incluso los gnomones, los estilos o indicadores verticales de ciertos relojes solares, cuya única función era proyectar su sombra. También los pozos parecían perder su sombra, puesto que la luz del Sol los inundaba de manera uniforme, «como un tapón que se ajustara perfectamente a su boca», según una fuente antigua¹⁴. (Exagero un poco; las sombras no desaparecían por completo sino que

¹³ Estas fuentes son, entre otras: Cleómedes, Capella, Estrabón, Plinio, Aelius Aristides, Heliodoro, Servio y Macrobio. Véanse extractos en: A. S. Gratwick, «Alexandria, Syene, Meroe: Symmetry in Erathostenes' Measurement of the World», en L. Ayres (ed.), *The Passionate Intellect: Essays in the Transformation of Classical Traditions*, Transaction Publishers, New Brunswick, 1995. Véase también: Aubrey Diller, «The Ancient Measurements of the Earth», *ISIS* 40 (1949), pp. 6-9; y J. B. Harley y D. Woodward, *The History of Cartography*, Vol. 1, University of Chicago Press, Chicago, 1987, pp. 148-160.

¹⁴ Aelius Aristides, citado en Gratwick, p. 183.

simplemente se proyectaban justo debajo de los objetos, en lugar de hacerlo hacia un lado, como suelen hacer).

Además, Eratóstenes sabía que Alejandría se encontraba al norte de Siena y aproximadamente sobre el mismo meridiano. Y gracias a los topógrafos reales que el gobierno egipcio enviaba a recorrer y cartografiar sus tierras cada año tras las inundaciones estacionales del Nilo, sabía que estas dos ciudades se hallaban a unos cinco mil estadios de distancia (la cifra fue redondeada, por lo que no podemos utilizarla para establecer la conversión entre estadios y otras unidades actuales).

En tiempos modernos diríamos de Siena que se encuentra en el Trópico de Cáncer, una línea imaginaria que pasa por el norte de México, el sur de Egipto, la India y el sur de China (aparece en la mayoría de globos terráqueos). Todos los puntos situados sobre el trópico comparten una característica única: el Sol se sitúa justo en la vertical sólo un día al año, durante el solsticio de verano, el 21 de junio. Las personas que viven al norte del Trópico de Cáncer nunca ven el Sol directamente por encima de sus cabezas, así que el Sol siempre proyecta una sombra. Quienes viven en el hemisferio norte pero al sur del Trópico de Cáncer ven el Sol justo en la vertical dos veces al año, una vez antes del solsticio y una segunda vez después, separados por un número de días que depende del lugar.

La razón de todo esto tiene que ver con la posición de la Tierra, cuyo eje se encuentra inclinado con respecto al Sol. Pero esto no tenía que importarle a Eratóstenes. Lo único importante era que cuando el Sol se hallaba justo por encima de la cabeza en Siena, no lo

estaba en ningún lugar situado al norte o al sur, y por supuesto tampoco en Alejandría, donde el gnomon de un reloj proyectaría una sombra. La longitud de esa sombra dependería de la curvatura de la Tierra; cuanto mayor fuera ésta, más larga sería la sombra.

Gracias a este conocimiento geométrico, Eratóstenes disponía de todo el saber necesario para diseñar un ingenioso experimento que le permitiera conocer el grado exacto de curvatura de la Tierra, y por ende su circunferencia.

Para apreciar la belleza de este experimento no necesitamos conocer los detalles de cómo lo puso en práctica Eratóstenes. Es una suerte que sea así, porque no nos ha llegado su relato de cómo lo hizo. Todo lo que sabemos al respecto lo debemos a descripciones incompletas e indirectas proporcionadas por sus coetáneos y sucesores, la mayoría de los cuales no llegaron a comprender todos los detalles. Tampoco necesitamos saber nada sobre el camino que siguió en su pesquisa, es decir, qué motivó su interés en el problema, cuáles fueron sus primeros pasos, qué tropiezos tuvo, cómo llegó por fin a darse cuenta de la solución y en qué otras direcciones indagó. Pero es una lástima que sea así, porque puede dar la impresión de que la idea le sobrevino de sopetón, que se le apareció de golpe ante los ojos; con todo, no nos impide comprender el experimento. Además, no tenemos que dar ningún salto intelectual especulativo o seguir argumentos matemáticos complejos o basarnos en ingeniosas conjeturas empíricas fundamentadas en cosas tan peregrinas como la demografía de los elefantes. La belleza de este experimento radica en la forma en que hace posible la

determinación de una dimensión de proporciones cósmicas a partir de la sola medición de la longitud de una pequeña sombra.

Su abrumadora simplicidad y elegancia puede plasmarse en los diagramas de las figuras 1.1 y 1.2.

Durante el solsticio, cuando el Sol se encuentra justo por encima de la cabeza en Siena (A), las sombras desaparecen, caen siguiendo la vertical hacia el centro de la Tierra (línea AB). Entretanto, en Alejandría (E) las sombras caen en la misma dirección (CD) porque los rayos del Sol son paralelos, pero como la Tierra es curva, forman un pequeño ángulo que denominaremos x . Un ángulo pequeño o, lo que es lo mismo, una sombra corta, indicarían una curvatura leve, casi plana, y una circunferencia de la Tierra muy grande; por el contrario, un ángulo grande o una sombra larga indicarían un curvatura pronunciada y una circunferencia pequeña. Pero ¿había algún modo de calcular con exactitud la circunferencia a partir de la longitud de la sombra? La respuesta estaba en la geometría.

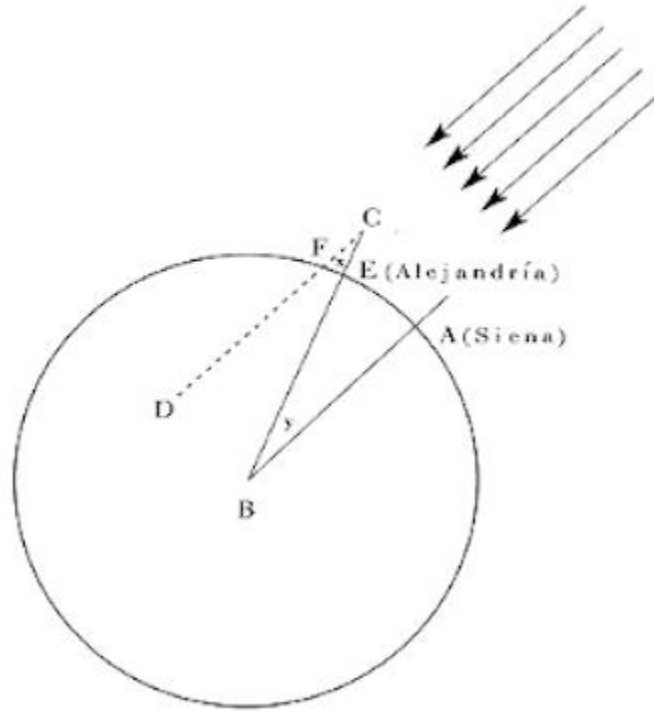


Figura 1.1. El ángulo creado por la sombra en Alejandría (x) es igual al ángulo (y) creado por los dos radios que pasan por Alejandría y Siena y se encuentran en el centro de la Tierra (la escala está distorsionada). Por tanto, la fracción que de un círculo completo es el arco de un sombra en Alejandría (EF) es igual a la fracción que de la circunferencia de la Tierra es la distancia (AE) de Siena a Alejandría.

De acuerdo con Euclides, los ángulos interiores de una línea que interseca dos líneas paralelas son iguales. Por consiguiente, el ángulo (x) formado por las sombras en Alejandría debe ser igual al ángulo (y) creado por los dos radios que nacen en el centro de la Tierra y pasan por Alejandría y Siena (BC y BA). Esto significa, a su vez, que el cociente entre la longitud del arco de un gnomon (FE) y el círculo completo alrededor del gnomon (véase la figura 1.2) es igual al cociente entre la distancia de Siena a Alejandría (AE) y la

circunferencia de la Tierra. Eratóstenes se dio cuenta de que sólo tenía que medir esta fracción para calcular la circunferencia de la Tierra.

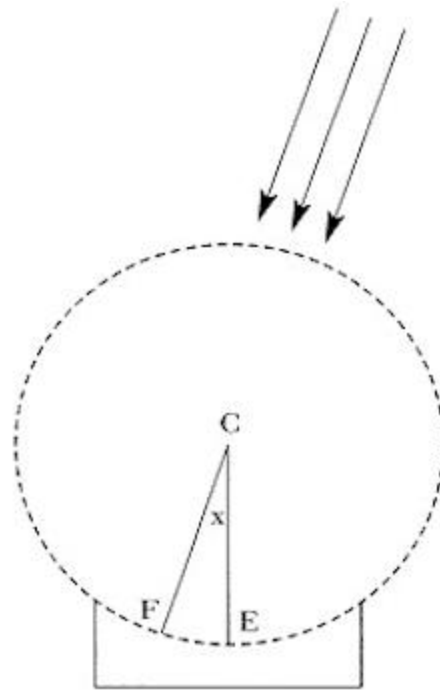


Figura 1.2. Eratóstenes puede haber medido o bien la fracción que la longitud de la sombra (EF) es respecto de la circunferencia del círculo descrito por el cuenco del reloj de sol, o bien la fracción que del círculo completo es el ángulo de la sombra (x).

Aunque Eratóstenes pudo haber hecho la medición de varias maneras, los historiadores de la ciencia están bastante seguros de que lo hizo con la ayuda de la versión griega del reloj solar, que proyecta una sombra bien definida. El contador de horas o *skaphe* consistía en un cuenco de bronce con un indicador o gnomon en su centro cuya sombra ascendía lentamente siguiendo unas líneas

horarias grabadas en la superficie del cuenco. Pero Eratóstenes utilizó este instrumento de un modo nuevo. No le interesaba la posición de la sombra con respecto a las líneas horarias para medir el paso del tiempo, sino el ángulo formado por el gnomon y su sombra en el mediodía del solsticio de verano. Podía medir entonces a qué fracción de un círculo correspondía ese ángulo (la práctica de medir en grados obtenidos de la división del círculo en 360 partes iguales no se hizo común hasta un siglo más tarde). O lo que es lo mismo, podía medir el cociente entre la longitud del arco proyectado por la sombra sobre el cuenco y la circunferencia completa del cuenco.

El mediodía del solsticio de verano Eratóstenes determinó que el arco formado por la sombra sobre el cuenco correspondía a $1/50$ parte del círculo completo (o, como diríamos hoy, un ángulo de 7,2 grados). La distancia entre Alejandría y Siena era, por tanto, la quincuagésima parte de la distancia total del meridiano. Multiplicando 5.000 estadios por 50 obtuvo el valor de 250.000 estadios para la circunferencia de la Tierra, cifra que más tarde ajustó a 252.000 estadios (ambas cifras equivalen más o menos a 40.200 kilómetros). La razón de este reajuste no está clara, pero probablemente tenga que ver con el deseo de simplificar los cálculos de distancias geográficas, ya que Eratóstenes solía dividir los círculos en sesenta partes y la sexagésima parte de 252.000 estadios es un número redondo: 4.200 estadios. Pero tanto si se usan 250.000 estadios como si se usan 252.000 estadios, e independientemente del factor de conversión que uno prefiera

utilizar para convertir los estadios en unidades modernas de longitud, la estima de Eratóstenes cae dentro de un pequeño margen de error respecto de la cifra aceptada actualmente de 40.000 kilómetros.

La imagen del cosmos que tenía Eratóstenes fue esencial para el éxito de su experimento. Sin ella, la medición de la longitud de la sombra no lo hubiera llevado a determinar la circunferencia de la Tierra. Por ejemplo, un antiguo texto chino de cartografía, el *Huainanzi* o «Libro del Maestro de Huainan», señala que dos gnomones de la misma altura pero situados a diferentes distancias (en la dirección norte-sur) proyectan sombras de distinta longitud en el mismo momento¹⁵. Bajo la suposición de que la Tierra era prácticamente plana, el autor atribuía esta diferencia a que el gnomon que proyectaba la sombra más corta se encontraba más directamente bajo el Sol y argumentaba que la diferencia en la longitud de las sombras podía utilizarse ¡para calcular la altura del cielo!

Los datos de Eratóstenes y sus mediciones eran aproximados. Probablemente fuera consciente de que Siena no se encontraba exactamente en el Trópico de Cáncer ni exactamente al sur de Alejandría. La distancia entre las dos ciudades no es exactamente cinco mil estadios. Y como el Sol no es un punto de luz sino un pequeño disco (de aproximadamente medio grado de anchura), la luz proveniente de uno de los lados de este disco no toca el gnomon

¹⁵ Cordell K. K. Yee, «Taking the World's Measure: Chinese Maps Between Observation and Text», en J. B. Harley y D. Woodward, *The History of Cartography*, Vol. 2, Libro 2, University of Chicago Press, Chicago, 1994, pp. 96-127 en la p. 97.

exactamente con el mismo ángulo que la luz procedente del otro lado del disco solar, haciendo que la sombra sea algo borrosa.

Pero, teniendo en cuenta la tecnología que Eratóstenes tenía a su disposición, el experimento era bastante bueno. Su cifra de 252.000 estadios fue aceptada por los griegos antiguos como un valor fiable de la circunferencia de la Tierra durante cientos de años. En el siglo I d. C. el autor romano Plinio alabó a Eratóstenes como «autoridad destacada» sobre la circunferencia de la Tierra, calificando su razonamiento de «sutil» y su cifra de «universalmente aceptada¹⁶». Un siglo después de Eratóstenes otro erudito griego intentó utilizar la diferencia entre el ángulo de visión de la estrella Canopo desde Alejandría y el ángulo de visión de la misma estrella desde Rodas (donde se decía que la estrella se encontraba justo en el horizonte) para medir la circunferencia de la Tierra, pero el resultado resultó no ser fiable. Ni siquiera un milenio después lograron los astrónomos árabes mejorar su resultado aunque lo intentaron por varios métodos, como medir el horizonte desde la cima de una montaña de altura conocida o medir la altura de una estrella desde el horizonte en dos lugares distintos pero al mismo tiempo. La medición de Eratóstenes no pudo ser mejorada hasta los tiempos modernos, cuando se consiguió medir de forma muy precisa la posición de los cuerpos celestes.

El experimento de Eratóstenes transformó la geografía y la astronomía. En primer lugar, permitió a cualquier geógrafo

¹⁶ Plinio, *Natural History*, Libro II, p. 247, The Loeb Classical Library, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1997. (Hay trad., cast.: *Historia natural*, Cátedra, Madrid, 2002).

establecer la distancia entre dos lugares de latitud conocida, por ejemplo entre Atenas y Cartago o entre Cartago y la desembocadura del Nilo. Permitió a Eratóstenes determinar el tamaño y posición del mundo habitado conocido, y proporcionó a sus sucesores una vara de medir para determinar otras dimensiones cósmicas como la distancia de la Tierra a la Luna, el Sol y las estrellas. En suma, el experimento de Eratóstenes transformó la imagen que los seres humanos tenían de la Tierra, de la posición de la Tierra en el universo (o al menos en el sistema solar) y del lugar que ocupan los seres humanos en este esquema.

El experimento de Eratóstenes, como toda forma de actuación, es abstracto en el sentido de que no depende de ninguna realización específica, y puede realizarse de muchas maneras. Fue, por tanto, una contribución a la cultura humana. Sus ingredientes son comunes y familiares: una sombra, un instrumento de medición y geometría de bachillerato. No hace falta ir a Alejandría o usar un *skaphe*; ni siquiera es necesario hacerlo durante el solsticio. Cientos de colegios de todo el mundo realizan el experimento de Eratóstenes. Algunos utilizan la sombra proyectada por relojes de sol de fabricación propia, otros por postes o astas. A menudo estas reconstrucciones del experimento se realizan en colaboración con otras escuelas por correo electrónico y utilizando una web de geografía para obtener las latitudes y longitudes y MapQuest para determinar la distancia. Estas reconstrucciones no son como las representaciones, por poner un ejemplo, de la batalla de Gettysburg que escenifican los entusiastas de la guerra de Secesión, pues en

este caso el objetivo es la exactitud histórica o por lo menos una simulación entretenida. Los estudiantes no copian o simulan el experimento de Eratóstenes, sino que realmente lo realizan como si fuera la primera vez, y el experimento les presenta el resultado fresco ante sus ojos y de forma tan directa que apenas queda lugar para la duda.

El experimento de Eratóstenes también ilustra de forma manifiesta y emocionante la naturaleza de la experimentación. ¿Cómo es posible que los científicos puedan llegar a conocer algo como la circunferencia de la Tierra sin necesidad de medirla físicamente? No somos impotentes, no tenemos que recurrir a métodos de fuerza bruta como una cinta métrica de miles de kilómetros de longitud. Una actuación representada con astucia, con la tramoya adecuada, puede hacer incluso que cosas efímeras y fluidas como las sombras revelen las dimensiones fijas e inalterables del cielo. El experimento de Eratóstenes nos deja ver de qué modo podemos encontrar la forma en el caos, incluso en fugaces sombras, con la ayuda de instrumentos de nuestra propia fabricación.

La belleza del experimento de Eratóstenes nace de su imponente amplitud. Algunos experimentos extraen orden del caos analizando, aislando o diseccionando algo ante nuestros ojos. Este experimento dirige nuestra atención en la dirección opuesta al medir la vastedad con cosas pequeñas. Amplía nuestra percepción al proporcionarnos una nueva forma de abordar una pregunta aparentemente sencilla: «¿qué son las sombras y cómo se forman?». El experimento hace que nos demos cuenta de que la dimensión de *esta* sombra concreta y

transitoria está relacionada con la redondez de la Tierra, con el tamaño y posición remota del Sol, con las posiciones siempre cambiantes de estos dos cuerpos y con todas las sombras del planeta. La enorme distancia que nos separa del Sol, la progresión cíclica del tiempo y la redondez de la Tierra adquieren una presencia casi palpable en este experimento que afecta a la cualidad de nuestra experiencia del mundo.

A menudo se piensa en los experimentos de las ciencias físicas como algo impersonal que disminuye la significación de la humanidad en el universo. La ciencia, según se cree a menudo, despoja a la humanidad de su posición privilegiada, y algunas personas compensan esta pérdida imaginada abrazando el pensamiento mágico, fantaseando con los lazos místicos que unen al Sol, los planetas y las estrellas con los destinos personales. Pero el experimento a primera vista abstracto de Eratóstenes nos humaniza de un modo más genuino al proporcionarnos un sentido realista de quiénes somos y de dónde estamos. Mientras casi todo lo que nos rodea celebra la grandiosidad, la inmediatez y el dominio, este experimento nos incita a valorar el poder revelador de la pequeñez, la temporalidad y a apreciar el modo en que las cosas de todas las dimensiones se encuentran, en último término, interconectadas.

Interludio

Por qué es bella la ciencia

¿Es realmente necesario que calificuemos de bello el experimento de Eratóstenes? Es cierto que cumple los tres criterios mencionados en la introducción: nos muestra algo fundamental y lo hace con eficacia y de un modo que nos satisface y nos deja con preguntas, no sobre el experimento sino sobre el mundo. Con todo, hay quien podría no estar de acuerdo en calificarlo de bello. He oído a algunas personas decir, por ejemplo, que hablar de la belleza de los experimentos es irrelevante, elitista y seductor.

Quienes dicen que la belleza de los experimentos es irrelevante por lo general quieren decir que la belleza pertenece al dominio de la subjetividad, la opinión y la emoción, mientras que la ciencia pertenece al dominio de la objetividad, los hechos y el intelecto. Algunos dirán, por ejemplo, que calificar de «bello» un experimento lleva a confundir los propósitos de las artes y las humanidades (explorar y ampliar la vida y la cultura humanas) y los de las ciencias (describir el mundo natural). O dirán que se comete lo que el filósofo Benedetto Croce llamaba «error intelectualista», la mezcla ilegítima de las artes y las ideas. El pintor y crítico John Ruskin llega incluso a incorporar con rigor esta división a su propia definición de belleza: «A todo objeto material que nos pueda proporcionar placer con la simple contemplación de sus cualidades externas sin que intervenga de modo directo y definido el intelecto lo considero de algún modo, o en algún grado, bello¹⁷». gusta tener que pensar para apreciar la belleza. Como los experimentos científicos

¹⁷ John Ruskin (ed.), y edición abreviada de D. Barrie, *Modern Painters*, Ebenezer Baylis & Son, Gran Bretaña, 1967, p. 17.

son hijos del intelecto, de acuerdo con esta objeción no pertenecen a la lista de cosas bellas.

Quienes dicen que la belleza de los experimentos es elitista llevan esta objeción aún más lejos. La belleza, nos dicen, sólo puede ser intuitiva y debe aprehenderse por experiencia directa. ¡A nadie se le ocurriría intentar apreciar la belleza de un cuadro de Van Gogh o de un concierto de Mozart a través de la lectura de su descripción! Por tanto, la belleza de los experimentos científicos sólo es apreciable por los propios científicos. J. Robert Oppenheimer señaló en una ocasión que, para una persona que no participara en ello, intentar entender el nacimiento de la mecánica cuántica, un acontecimiento «de terror tanto como de exaltación», sería como escuchar «los relatos de los soldados que vuelven de una campaña de dureza y heroísmo sin igual, o de exploradores del Himalaya, o relatos de enfermedades graves o de la comunión mística con Dios», a lo que añadía que «esos relatos transmiten poco de lo que nos quiere decir el narrador». Las bellezas de ese mundo, que al parecer son muchas, sólo son accesibles para sus habitantes. Una gran parte de la mansión de la belleza queda manifiestamente fuera del alcance de quienes no son científicos. Esto es anatema para la actual sensibilidad democrática y huele a elitismo.

Una tercera y poderosa objeción es el argumento de la seducción. Los científicos dicen que su trabajo consiste en dar con teorías que funcionen y que sería, en el mejor de los casos, una distracción, y en el peor de los casos, un peligro, que quienes practican la ciencia

se tornen demasiado conscientes de que crean objetos de belleza¹⁸. Los científicos podrían poner trabas a su intelecto y «ablandarse» al prestar atención a la belleza; sólo las personas que no se dejan seducir por la estética están preparadas para usar la imaginación y la razón en la ciencia. Por otro lado, quienes no son científicos temen que hablar de la belleza de la ciencia no sea simplemente superficial y apele a los sentimientos, sino que sirva para encubrir unos objetivos ocultos de relaciones públicas. Simpatizar es fácil. Las imágenes que acompañan a la mayoría de las conferencias sobre la belleza en la ciencia a las que he asistido no tuvieron su origen en el laboratorio sino en los departamentos de relaciones públicas. En una, la última diapositiva era la famosa imagen de la Tierra elevándose sobre la superficie lunar. Es una fotografía bella sin duda. Pero aunque durante décadas haya sido de enorme utilidad para la maquinaria publicitaria de la NASA, los astrónomos nunca la han utilizado como dato.

Estas tres objeciones tienen su base en una comprensión errónea de la belleza. La primera de ellas confunde la belleza con la ornamentación. La manera más fácil de perder de vista la belleza de la ciencia consiste en hacerla objeto de estética, fijarse en su apariencia externa. La belleza de un experimento radica en cómo nos presenta lo que hace. Como veremos más adelante, la belleza del *experimentum crucis* de Newton no tiene nada que ver con los

¹⁸ En su libro *The Concepts of Science*, por ejemplo, Lloyd Motz y Jefferson Weaver mencionan la belleza ocasional del campo pero advierten de que «la exaltación de nuestras emociones y sensaciones hasta el nivel de las grandes verdades oscurece la naturaleza de la verdad científica y abre la puerta al misticismo y la metafísica, que no tienen lugar en la ciencia», Plenum, Nueva York, 1988, p. 12.

colores que producen sus prismas (de hecho, para concebir el experimento tuvo que mirar más allá de los colores), sino con la manera como nos revela lo que hacen con la luz. La belleza del experimento de Cavendish para pesar el mundo no tiene nada que ver con la apariencia externa de un monstruoso instrumento sino con su austera precisión. Y el experimento de Young no debe su belleza al prosaico dibujo pautado en tiras de blanco y negro sino a la manera como éstas nos revelan algo esencial sobre la luz.

La segunda objeción, como la primera, peca de no reconocer hasta qué punto nuestra (cultivada) percepción se encuentra ligada a los sentimientos y las emociones. No somos ingenuos en el laboratorio del mismo modo que no somos ingenuos en un museo de arte. Para aprehender la belleza de la pintura, la música o la poesía utilizamos una percepción cultivada con el tiempo, y, por otro lado, no es difícil que *no logremos* reconocer la belleza de cosas que apenas requieren que «ejercitemos el intelecto» para aprehenderlas. (Por poner un ejemplo, un poema de Pablo Neruda, «Oda a los calcetines», describe la belleza de una prenda de vestir). El esfuerzo necesario para apresar la belleza de los experimentos no es un obstáculo; desde luego no lo es para apreciar la de los diez experimentos descritos en este libro. El verdadero obstáculo quizá sea nuestra tendencia a ver todo lo que nos rodea de manera instrumental, con relación al modo en que nos puede servir para alcanzar unos objetivos. Quizá nuestra apreciación de la belleza sólo esté adormecida y necesite desperezarse. Como escribió Willa Cather, «la belleza no es tan

abundante como para poner reparos a deshacer unos cuantos pasos para apresarla¹⁹».

La tercera objeción es la más fuerte y profunda. Es una versión del viejo conflicto entre la razón y el arte, antiguo ya en tiempos de Platón: el miedo a que los seres humanos estén más dispuestos a extasiarse ante las apariencias que a dejarse convencer por la lógica. Para Platón, en *La República*, las artes se dirigen a las pasiones más que a la razón, «gratifican la parte más necia del alma» y nos descarrian²⁰. San Agustín es otro de los pensadores que vio un peligro en la capacidad de los sentidos para abrumar a la razón, advirtiendo incluso del peligro que supone la música religiosa y confesando que en alguna ocasión encuentra «el propio canto más emocionante que la verdad que transmite». «Esto», prosigue, «es un pecado de mucha gravedad, y en esas ocasiones prefiero no escuchar el canto²¹». Esta tercera objeción se convierte en un relato de terror: tened cuidado con el poder mágico y seductor de las imágenes; aferraos a la razón y la lógica. Es por ello que muchas filosofías orientadas a la lógica divorcian o incluso oponen la verdad a la belleza. «Preguntarnos sobre la verdad», escribió el lógico Gottlob Frege en una de sus obras más influyentes, «nos llevaría a

¹⁹ Willa Cather, «Portraits and Landscapes», citado en Daniel Halpern (ed.), *Writers on Artists*, North Point Press, San Francisco, 1988, p. 354.

²⁰ Platón, *The Republic of Plato*, tr. Alan Bloom, Basic Books, Nueva York, 1969, 605b. (Hay trad. cast.: *La República o el Estado*, Omega, Barcelona, 2003).

²¹ San Agustín, *Confessions*, tr. R. S. Pine-Coffin, Penguin, Baltimore, Maryland, 1970, Libro X, Sección 33. (Hay trad. cast.: *Confesiones*, Alianza, Madrid, 2003).

abandonar el disfrute estético y abrazar una actitud de investigación científica²²».

La respuesta a esta tercera objeción nos transporta hasta el corazón de la ciencia y del arte, y requiere que apelemos a tradiciones filosóficas distintas de las dominadas por los modelos de la lógica o las matemáticas. Estas tradiciones apelan a una concepción más fundamental de la verdad como descubrimiento de algo más que como representación precisa de ese algo (Heidegger señalaba con insistencia que la palabra griega para la verdad, *alétheia*, significa literalmente «desocultamiento»). Estas tradiciones desbrozan el camino que nos conduce a ver la investigación científica como algo íntegramente enlazado con la belleza. Ésta no es un poder mágico que opere más allá o con independencia del descubrimiento de la verdad, sino que lo acompaña; es, por así decirlo, un subproducto inconsciente de la ciencia. La belleza es el talismán que nos permite alcanzar un nuevo asidero en la realidad, librándonos así de las ataduras de nuestro intelecto y haciendo más profunda nuestra implicación con la naturaleza. Es en este sentido que la belleza puede contrastarse con la elegancia, en la que falta ese nuevo asidero²³. La «belleza» describe el ajuste o adaptación entre un

²² Gottlob Frege, «On Sense and Reference», en Peter Geach y Max Black (eds.), *Translations from the Philosophical Writings of Gottlob Frege*, Blackwell, Oxford, 1952, p. 63. (Hay trad. cast.: *Escritos filosóficos*, Crítica, Barcelona, 1996).

²³ Sobre la distinción entre belleza y elegancia, véase Michael Polanyi, «Beauty, Elegance, and Reality in Science», en S. Korner, *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics*, Dover, Nueva York, 1957, pp. 102-106.

objeto que revela un nuevo asidero y nuestra apertura ante aquello que es revelado²⁴.

¿Realmente consigue eso el experimento de Eratóstenes?

Es posible ver este experimento de forma abstracta como una versión del s. III a. C. de un sistema de posicionamiento global, como un problema de cuantificación o un ejercicio intelectual. Es así como lo vieron la mayoría de mis compañeros de clase cuando nos lo enseñaron en la escuela y así es como nos lo presentó el profesor. Pero para verlo de ese modo primero tenemos que sofocar nuestras imaginaciones, las que incitan nuestro deseo imperioso de dar con la respuesta correcta, la docencia científica convencional y el hecho de haber visto imágenes de satélite. Pocas veces prestamos atención a las sombras, esos epifenómenos de la luz, o pensamos «¡qué bonitas!» y seguimos con lo nuestro. Pero el experimento de Eratóstenes nos muestra que todas las sombras de la Tierra iluminada por el Sol están entretreídas en un todo que evoluciona sin cesar. Contemplar el experimento de Eratóstenes, lejos de ahogar nuestra imaginación, la estimula, nos aleja de la rutina y nos hace más conscientes de nuestro lugar en el universo.

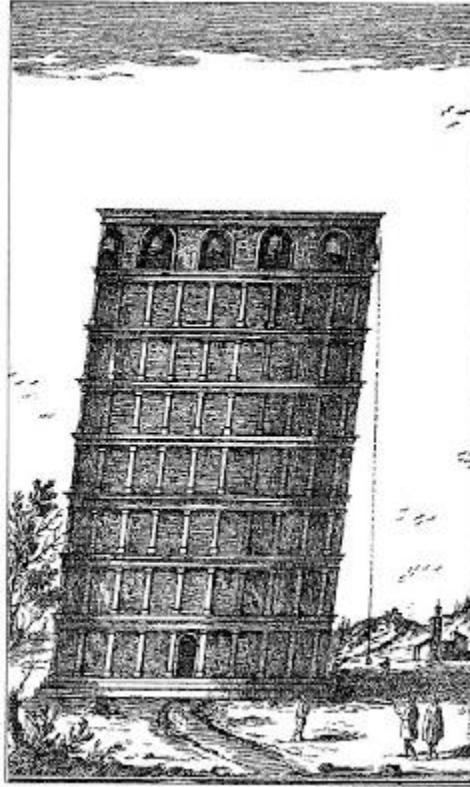
²⁴ En palabras del filósofo Robin Collingwood: «Se ha planteado en ocasiones la pregunta de si la belleza es “objetiva” o “subjetiva”, con lo que se quiere decir si pertenece al objeto y es por éste impuesto a la mente por fuerza bruta, o si pertenece a la mente y es por ésta impuesta al objeto con independencia de la propia naturaleza del objeto... [L]a verdadera belleza no es ni “objetiva” ni “subjetiva” en un sentido que excluya al otro. Es una experiencia en la que la mente se encuentra en el objeto, en la que la mente se alza hasta la altura del objeto y el objeto, por así decirlo, está preadaptado para provocar la expresión más plena de los poderes de la mente... De este modo surge esa ausencia de limitaciones, ese profundo sentimiento de felicidad y bienestar, que caracteriza a la experiencia de la auténtica belleza. Sentimos “que es bueno para nosotros estar aquí”; estamos cómodos, pertenecemos al mundo y el mundo nos pertenece». (R. G. Collingwood, *Essays in the Philosophy of Art*, Indiana University Press, Bloomington, Indiana, 1966, pp. 87-88).

Si nos acercamos a la belleza con rigor, concluiremos que el experimento de Eratóstenes es bello. Como todas las cosas bellas, nos sitúa lejos del mundo donde podamos verlo con calma al tiempo que nos arroja con fuerza contra él.

Capítulo 2

Que caiga la bola

La leyenda de la torre inclinada



La torre inclinada de Pisa

Superficie de la luna, 2 de agosto de 1971

Comandante David R. Scott: Veamos, en mi mano izquierda tengo una pluma y en la derecha, un martillo. Al parecer una de las razones por las que estamos aquí tiene que ver con un caballero llamado Galileo que hace ya mucho tiempo hizo un descubrimiento bastante importante sobre la caída de los objetos en un campo de gravedad. Así que pensamos, ¿qué mejor lugar para confirmar sus hallazgos que en la superficie de la Luna?

[La cámara se acerca a las manos de Scott, una de las cuales sostiene una pluma y la otra, un martillo; luego el objetivo se aleja hasta encuadrar todo el paisaje y la nave de alunamiento del Apolo 15, el Halcón].

David R. Scott: Y hemos pensado que podríamos intentarlo aquí ante todos ustedes. La pluma, naturalmente, es de halcón. Dejaré caer los dos objetos y, si todo va bien, los dos tocarán el suelo al mismo tiempo.

[Scott suelta el martillo y la pluma, que caen juntos hasta tocar el suelo casi simultáneamente algo más de un segundo más tarde].

David R. Scott: ¡Qué les parece! ¡El señor Galileo tenía razón²⁵!

* * * *

Dice la leyenda que el experimento de la torre inclinada de Pisa dejó establecido por primera vez y de forma convincente que los objetos de peso distinto caen con la misma aceleración, echando por tierra la autoridad de Aristóteles. Esta leyenda se asocia con una sola persona (el matemático, físico y astrónomo italiano Galileo Galilei), con un solo lugar (la torre inclinada de Pisa) y con un único episodio. ¿Qué hay de verdad en esta leyenda y qué misterios esconde?

Galileo (1564-1642) nació en Pisa en una familia de músicos. Su padre, Vincenzo, fue un conocido intérprete de laúd aficionado a la

²⁵ Véase la página web de la NASA sobre el experimento de la pluma en la luna (<http://vesuvius.jsc.nasa.gov/er/seh/feather.html>).

experimentación controvertida y que condujo investigaciones sobre la entonación, los intervalos y la afinación en los que daba más importancia al oído que a la autoridad de los antiguos académicos de la música. El hijo de Vincenzo compartía con su padre la voluntad firme. Un biógrafo de Galileo, Stillman Drake, destaca dos rasgos de su personalidad que considera esenciales para su éxito como científico. El primero era la «disposición pugnaz» de Galileo, que hacía que no temiera e incluso se mostrara ansioso por entablar batallas «para derrocar a la tradición y vindicar su posición científica». El segundo era que la personalidad de Galileo quedaba equilibrada entre dos extremos de temperamento: uno, que «se deleitaba en la observación de las cosas, apreciando las semejanzas y relaciones entre ellas y desarrollando generalizaciones sin que lo perturbaran en exceso las excepciones y las anomalías», y otro, que «se inquietaba y preocupaba por cualquier desviación de una norma que no pudiera explicarse [y] que podía incluso preferir desechar la norma antes que conformarse con una que no funcionara siempre con precisión matemática». Ambos rasgos son útiles en la ciencia y todos los científicos los poseen en alguna proporción, aunque por lo general predomina uno de ellos. Pero el temperamento de Galileo, al decir de Drake, era un equilibrio justo entre estos dos extremos²⁶. E igualmente esencial para el impacto que Galileo tuvo en el mundo fue su habilidad literaria, que le permitió comunicarse con quienes le rodeaban y persuadirlos.

²⁶ Stillman Drake, *Galileo Studies: Personality, Tradition, and Revolution*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1970, pp. 66-69. (Del mismo autor, en castellano puede consultarse Stillman Drake, *Galileo*, Alianza, Madrid, 1991).

Galileo ingresó en la Universidad de Pisa probablemente en el otoño de 1580 con la intención de estudiar medicina, pero pronto quedó fascinado con las matemáticas. Obtuvo una plaza en la universidad como docente en 1589 y comenzó a investigar el movimiento de los cuerpos al caer. Estuvo en la Universidad de Pisa tres años; si el experimento de la torre inclinada se realizó en algún momento, tuvo que ser durante este período. En 1592 Galileo se mudó a Padua, donde vivió durante dieciocho años y donde realizó la mayor parte de su trabajo científico más importante, en el que se incluye la construcción de un telescopio que le permitió realizar descubrimientos astronómicos. Así, Galileo fue el primero en observar las lunas de Júpiter. También se produjo aquí la primera ocasión en que Galileo provocó polémica, ya que sus descubrimientos astronómicos contradecían el sistema ptolemaico (en el que el Sol se desplaza alrededor de la Tierra) y la explicación aristotélica del movimiento, y respaldaban el sistema copernicano (en el que la Tierra se mueve alrededor del Sol). También en Padua se hicieron célebres sus elaboradas demostraciones de las leyes físicas, que impartía en una sala con capacidad para dos mil personas. En 1610 se trasladó a Florencia, a la corte del gran duque de Toscana. En 1616, Galileo fue advertido de que no «mantuviera o defendiera» la doctrina copernicana, pero dieciséis años más tarde, en 1632, publicó una obra brillante, *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo, ptolemaico y copernicano*, que aunque fue aprobada por los censores, pronto se vio que constituía una buena defensa del sistema copernicano, por lo que al año siguiente, en

1633, Galileo fue convocado a Roma por la Iglesia católica y forzado a decir que «abjuraba, maldecía y detestaba» sus pasados errores. Fue sentenciado a lo que equivalía a un arresto domiciliario, y hubo de pasar sus últimos años en un pueblo llamado Arcetri, a las afueras de Florencia. Poco antes de su muerte, Galileo contó con los servicios de un joven y prometedor matemático llamado Vincenzo Viviani, que se convirtió en un fiel secretario y discípulo del entonces ciego científico y escuchó con paciencia sus recuerdos, sus reflexiones y sus invectivas. Dedicado a preservar el recuerdo de Galileo, fue Viviani quien escribió su primera biografía.

A esta afectuosa biografía debemos muchas de las más célebres leyendas galileanas. Una de ellas es la historia del péndulo abrahámico, de cómo Galileo, siendo todavía estudiante de medicina, en 1581, utilizó su propio pulso para medir el período de oscilación de una lámpara que colgaba del baptisterio del Duomo de Pisa y descubrió su isocronía. Los historiadores saben que esta historia no puede ser totalmente precisa: la lámpara que cuelga allí en la actualidad fue instalada en 1587. Pero quizá la historia tenga un punto de verdad, porque sin duda su predecesora obedecía las mismas leyes de la física. La historia más famosa de Viviani relata cómo Galileo ascendió hasta lo más alto de la torre inclinada de Pisa y «en presencia de otros profesores y filósofos y de todos los estudiantes», y mediante «repetidos experimentos», demostró que «la velocidad de cuerpos en movimiento con la misma composición pero peso distinto que se desplazan por el mismo medio no alcanza la

proporción de su peso, tal como Aristóteles había decretado, sino que se mueven con la misma velocidad²⁷».

En sus propios libros, Galileo propone argumentos de varios tipos en los que usa la lógica, la experimentación y las analogías para explicar por qué dos objetos de peso desigual caen a la misma velocidad en el vacío. Sin mencionar de forma explícita la torre inclinada de Pisa, Galileo refiere que «ha realizado la prueba» en el exterior con una bala de cañón y una bala de mosquete, demostrando que por regla general caen casi al mismo tiempo. Su maníática mención de esta desviación de lo que parecía una generalización apropiada, así como el hecho de que Viviani no la mencione y de que, además, el relato de Viviani sea nuestra única fuente sobre el episodio de la torre inclinada de Pisa, hacen que muchos historiadores duden de que éste se haya producido.

Con independencia de si Galileo realmente llevó a cabo el experimento en la torre inclinada, está claro que se esconde mucho más detrás de su cambio de pensamiento desde el marco aristotélico hasta sus últimos análisis sobre el movimiento. La filosofía natural aristotélica, que incluía una explicación del movimiento en lo que hoy denominaríamos su física, proporcionaba un sistema coherente y plenamente articulado basado en la idea de una Tierra central y estacionaria y un dominio celeste, en el que los objetos se comportaban de manera muy distinta a como lo hacen en la Tierra. Que Galileo dudara de, y luego cuestionara, el sistema aristotélico equivalía a dudar y cuestionar estos dos aspectos, la idea

²⁷ Vincenzo, Viviani, *Vita di Galileo*, Rizzoli, Milán, 1954.

aristotélica de una Tierra estacionaria y su explicación del movimiento de la Tierra.

Un rasgo central de la visión aristotélica del universo es que cielo y Tierra eran dos dominios distintos constituidos por tipos diferentes de sustancias y gobernados por leyes diversas. En el firmamento, los movimientos eran ordenados, precisos, regulares y matemáticos, mientras que en la Tierra eran confusos e irregulares y sólo podían describirse de forma cualitativa. Además, el movimiento de los cuerpos en la Tierra estaba gobernado por su tendencia a buscar su «lugar natural»; para los objetos sólidos, éste se encontraba abajo, hacia el centro de la Tierra. Por tanto, Aristóteles distinguía entre un «movimiento violento», el que se producía al impulsar hacia arriba de forma antinatural un objeto pesado, y su «movimiento natural» hacia el suelo.

Aristóteles había observado el movimiento de caída de los objetos y se había percatado de que la velocidad con que se producía variaba según el medio dependiendo de si éste era «más sutil» que el aire o «más denso», como los líquidos. Observó también que los cuerpos alcanzaban una velocidad dada en su caída y que ésta era proporcional a su peso. Estas ideas concuerdan con nuestra experiencia cotidiana. Si dejamos caer una pelota de golf y una de tenis de mesa desde una ventana, la pelota de golf caerá más rápido y golpeará antes el suelo. Si dejamos caer la pelota de golf en una piscina, caerá hasta el fondo más lentamente que cuando cae por el aire, en tanto que una bola de acero le ganaría la carrera hasta el fondo. De igual modo, los martillos caen más rápido que las plumas.

Aristóteles había codificado todas sus observaciones de este tipo dentro de un marco o, como los filósofos de la ciencia dirían hoy, un «paradigma», orientado a explicar los fenómenos corrientes. Un agente (por ejemplo, un caballo) se enfrenta a obstáculos (la fricción y otros tipos de resistencia) cuando intenta mantener un cuerpo (un carro) en movimiento. En estas circunstancias familiares, el movimiento representa casi siempre un equilibrio entre fuerza y resistencia. Por ello, Aristóteles abordó el problema de la caída de los cuerpos como un caso más en que a una fuerza (una tendencia natural, de acuerdo con su manera de verlo, a desplazarse hacia el centro de la Tierra) se le oponía una resistencia (la densidad o sutileza, o, como diríamos hoy, la «viscosidad» del medio en que se movían). Concluyó también que en ausencia de un medio que ofrezca resistencia, la velocidad de caída de los cuerpos se haría infinita.

En términos modernos, el planteamiento de Aristóteles no consigue incorporar la aceleración de manera adecuada. Ya se había comenzado a sospechar algo a este respecto mucho antes de Galileo. Así, en el siglo VI d. C. el estudioso bizantino Juan Filópono describió experimentos que contradecían a Aristóteles: «Pues si se dejan caer desde una misma altura dos pesos tales que uno sea mucho más pesado que el otro, se verá que la relación entre los tiempos requeridos para completar el desplazamiento no depende del cociente entre los pesos, sino que la diferencia en el tiempo es muy pequeña». De hecho, continúa Filópono, si uno de los cuerpos

pesara tan sólo el doble que el primero, «no habría diferencia en el tiempo, o ésta sería imperceptible²⁸».

En 1586, antes de que Galileo se trasladara a Padua, su coetáneo el ingeniero flamenco Simon Stevin describió unos experimentos que mostraban que la explicación de Aristóteles era errónea. Stevin dejó caer dos bolas de plomo, una de las cuales era diez veces más pesada que la otra, desde una altura de unos nueve metros hasta un tablón, de manera que al tocar suelo los objetos hicieran un sonido audible. «Se halla entonces», escribió Stevin, «que el más ligero no tarda en caer diez veces más tiempo que el más pesado, sino que caen juntos hasta el tablón de forma tan simultánea que sus dos sonidos parecen uno y el mismo golpe²⁹». Aristóteles, en suma, estaba equivocado en este punto.

En vida de Galileo, varios estudiosos italianos del siglo XVI describieron experimentos relacionados con la caída de objetos cuyos resultados contradecían a Aristóteles. Uno de ellos fue un profesor de Pisa (que enseñaba allí cuando Galileo era estudiante), Girolamo Borro, que en sus escritos describe cómo había «lanzado» repetidamente (el verbo que utiliza es ambiguo) objetos de igual peso pero de tamaño y densidad distintos, y en cada ocasión había encontrado que los pesos más densos caían más lentamente³⁰.

²⁸ Citado en I. Bernard Cohen, *The Birth of a New Physics*, Norton, Nueva York, 1985, p. 7. (Hay trad. cast.: *El nacimiento de una nueva física*, Alianza, Madrid, 1989).

²⁹ *Ibid*, pp. 7-8.

³⁰ Citado en Thomas B. Settle, «Galileo and Early Experimentation», en *Springs of Scientific Creativity: Essays on Founders of Modern Science*, R. Aris, H. Davis y R. Stuewer (eds.), University of Minnesota Press, Minneapolis, 1983, p. 8.

La obra de Aristóteles, como la de todo gran científico con intereses amplios, estaba salpicada de fallos y errores. Sin embargo, hasta Galileo la mayoría de los pensadores europeos no daban mucha importancia a estas imperfecciones. El gran logro de Galileo fue demostrar que la explicación del movimiento debida a Aristóteles estaba inextricablemente ligada a todo un marco científico que afectaba a mucho más que la caída de objetos, y que una explicación del movimiento que diera cuenta del comportamiento de caída de los cuerpos tenía que incluir el fenómeno de la aceleración, y esto requería la construcción de un marco teórico nuevo. Aristóteles sabía que los cuerpos ganaban velocidad (se aceleraban) cuando caían, pero no lo consideró un rasgo esencial de la caída libre, sino sólo una característica accidental y sin importancia que presentaba el movimiento entre el momento en que un cuerpo era soltado y el momento en que alcanzaba la velocidad uniforme que por su naturaleza le correspondiera. Galileo al principio compartía esta idea, pero con el tiempo se percató de la importancia de la aceleración y del hecho de que no podía simplemente «añadirse» al sistema aristotélico. Si Aristóteles estaba equivocado acerca de la caída de los cuerpos, no iba a ser posible remedar su obra: habría que renovarla completamente.

Galileo no llegó a comprender esto de forma inmediata sino que, como es natural para la época, partió de la suposición de que Aristóteles tenía razón. Ninguna prueba única y singular fue decisiva a la hora de modificar esta opinión. Alcanzó su trayectoria revolucionaria a través de toda una serie de investigaciones,

algunas astronómicas y otras más mundanas sobre el péndulo y la caída de los cuerpos.

En su primera discusión sobre el comportamiento de caída libre de los cuerpos, un manuscrito inédito titulado *Sobre el movimiento* (que escribió durante su estancia en la Universidad de Pisa), Galileo se aferra al concepto aristotélico de que los cuerpos caen con una velocidad uniforme que depende de su densidad y que él mismo califica como una de «las normas generales que gobiernan la relación de velocidades en el desplazamiento [natural] de los cuerpos». Una bola de oro debería caer a una velocidad dos veces mayor que una de plata del mismo tamaño, porque la primera es casi dos veces más densa que la segunda. Según parece, Galileo quiso comprobar que así ocurría en la realidad, pero para su sorpresa y consternación, constató que el experimento no funcionaba. «[S]i se toman dos cuerpos distintos», escribió, «con tales propiedades que el primero debería caer dos veces más rápido que el segundo, y se los deja caer desde una torre, el primero no llegará al suelo el doble de rápido ni siquiera a una velocidad apreciablemente más rápida³¹». Los historiadores concluyen de esto que, incluso al principio de su carrera, Galileo estaba decidido a contrastar la teoría con observaciones. No obstante, en el mismo libro Galileo realiza también la extraña aseveración de que el cuerpo más ligero al principio avanza más rápido que el cuerpo más pesado, pero que éste al final lo alcanza. Esto ha llevado a algunos a

³¹ Galileo Galilei, *On Motion and on Mechanics*, tr. Stillman Drake, ed. I. E. Drabkin, University of Wisconsin Press, Madison, 1960.

dudar de la sinceridad de Galileo o de su habilidad como experimentador.

A los pocos años Galileo había cambiado de opinión acerca de la caída de los cuerpos, abandonando por completo el marco aristotélico. El proceso de razonamiento que lo llevó a hacerlo fue complejo y en él intervinieron varias formas de pensamiento y de evidencia empírica, además de los movimientos que se producen en la Tierra. Los estudiosos de Galileo han logrado reconstruir buena parte de este proceso mediante un análisis laborioso y meticuloso de sus cuadernos de notas. En sus propios libros, el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* (1632) y *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias* (1638), Galileo presenta una serie de argumentos sobre el comportamiento de caída libre de los cuerpos. Escritos en un estilo que hoy nos parece extraño, ambos libros conforman un extenso diálogo que se produce a lo largo de varios días entre tres hombres: Salviati, que es la voz del propio Galileo; Simplicio, que representa la posición aristotélica y, probablemente, la posición inicial de Galileo (y que, como su nombre indica, es una persona un tanto ingenua); y Sagredo, una persona culta con sentido común. Este formato literario le permitía a Galileo debatir libremente sobre cuestiones espinosas desde un punto de vista político y teológico, y en especial sobre el sistema copernicano, sin comprometerse. Si Salviati proponía un argumento «impío», Galileo podría defenderse diciendo que se trataba tan sólo de un personaje ficticio cuyos puntos de vista no necesariamente compartía el autor. Este formato le permitía también explorar distintas maneras de presentar sus

propios argumentos. Por tanto, los argumentos de Salviati no reproducen necesariamente el hilo de pensamiento que siguió Galileo en la realidad, sino que más bien recapitulan sus conclusiones.

En ambos libros, Salviati y Sagredo debaten acerca de varios experimentos que afirman haber realizado con cuerpos de distintos pesos y composiciones. Durante la discusión del Primer Día de los *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, Salviati rebate la supuesta afirmación de Aristóteles según la cual habría comprobado que los objetos pesados caen más rápido que los ligeros. Sagredo dice entonces:

Pero yo... que he hecho la prueba, os aseguro que una bala de cañón de cien libras de peso (o doscientas o más) no se adelanta ni en un palmo a la llegada al suelo de una bala de mosquete de no más de la mitad [de una onza], habiendo partido ambos cuerpos de una altura de doscientos brazos [un brazo es algo más de medio metro]... el mayor se adelanta al menor en cinco centímetros; es decir, cuando el mayor toca el suelo, el otro está sólo cinco centímetros por detrás.

Salviati añade: «[M]e parece a mí que podemos creer, con una gran probabilidad, que en el vacío todas las velocidades serían completamente iguales». Más adelante, en el Cuarto Día, observa:

[L]a experiencia nos demuestra que dos bolas del mismo tamaño, una de un peso diez o doce veces mayor que la otra (por ejemplo, una de plomo y la otra de madera de roble), que desciendan desde una altura de 150 o 200 brazos, llegan al suelo con una diferencia

minúscula en la velocidad. Esto nos indica con seguridad que el [papel de] el aire en impedirlos y retardarlos es pequeño³².

Salviati quizá fuera un personaje de ficción, pero no cabe duda de que divulgaba el trabajo de Galileo. Según creen muchos historiadores, su afirmación de que había realizado un experimento demuestra que Galileo realmente había dejado caer objetos de distintos pesos para investigar y desafiar la explicación aristotélica del movimiento. Al parecer lo hizo desde torres (quizá incluso desde la torre inclinada de Pisa) para turbación de sus colegas aristotélicos, quienes tenían que reconocer a partir de otros argumentos de Galileo que esto planteaba problemas no sólo para la explicación aristotélica de los movimientos en la Tierra, sino también para el resto de su sistema. Es cierto que algunos de sus predecesores ya habían observado deficiencias en la explicación aristotélica del movimiento, pero Galileo fue más lejos al demostrar hasta qué punto ésta era una parte esencial del sistema aristotélico, al proponer una explicación alternativa del movimiento, al desarrollar el pensamiento abstracto que requería esta alternativa y, finalmente, al ilustrar su importancia. Tanto si Galileo dejó caer bolas desde lo alto de la torre inclinada como si no, fue sin duda una figura principal en el desarrollo de una alternativa a la teoría aristotélica de la caída de los cuerpos.

³² Galileo Galilei, *Two New Sciences*, tr. Stillman Drake, University of Wisconsin Press, Madison, 1974, pp. 66, 75, 225-226. (Hay trad. cast.: *Dos nuevas ciencias*, Planeta-De Agostini, Barcelona, 1996).

Viviani le hizo un bien a su maestro. Como dice el adagio italiano, «Se non è vero, è ben trovato» («Si no es cierto, merece serlo»), así que estamos plenamente justificados al hablar del experimento de Galileo de la torre inclinada.

Pero ¿cómo y por qué arraigó este experimento con tanta firmeza en la cultura popular como punto de inflexión en la transición hacia la ciencia moderna?

Una de las razones es la fuerza con la que Viviani relata el episodio en una escena breve pero cautivadora. Viviani por lo general ponía mucho cuidado en ajustarse a la verdad, pero también sabía que escribía para un público concreto de académicos literarios, miembros del clero, políticos y otras personas destacadas pero no científicas a los que poco importaban las matemáticas y los detalles técnicos, pero que podían motivarse con una historia bien contada. «Cabe suponer que Viviani», escribió el historiador Michael Segre, «nunca imaginó que algunos de sus futuros lectores serían incrédulos historiadores de la ciencia³³».

Una segunda razón es la tendencia de la literatura popular e incluso histórica a destacar un único episodio que resuma y represente una serie compleja de acontecimientos importantes. En el caso de la transición desde el marco teórico aristotélico al moderno, el episodio de la torre inclinada cumple a la perfección con esas condiciones, aunque tenga el desafortunado efecto de desdibujar el contexto y de implicar que este experimento fue el punto de partida para la

³³ Michael Segre, *In the Wake of Galileo*, Rutgers University Press, New Brunswick, Nueva Jersey, 1991, p. 111.

comprensión del movimiento por Galileo o que las consideraciones sobre el movimiento fueron de gran importancia en la colisión entre los dos marcos teóricos.

Una última razón es nuestra debilidad por las historias de David y Goliat (al menos cuando David es uno de los nuestros) en las que alguna autoridad reinante es ilegítimada, humillada y desterrada gracias a una argucia. Son historias que parecen elevar nuestra propia sabiduría.

Los experimentos, como muchas otras formas de actuación, tienen una historia de creación o nacimiento que culmina en la primera representación y una historia de maduración que comienza entonces y trata de todo lo que ocurre después; una biografía, si se quiere. Al igual que la medida de la circunferencia de la Tierra por Eratóstenes, los experimentos de Galileo sobre el movimiento de caída libre de los cuerpos fueron al mismo tiempo algo que se hizo en un lugar y tiempo concretos y un patrón de algo que podía volver a hacerse de formas distintas y con diferentes objetos, tecnologías y grados de precisión. Con el tiempo, la experimentación de Galileo sobre la caída de los cuerpos generaron todo un género de experimentos y demostraciones, lo que podríamos llamar la prole de la torre inclinada.

Por ejemplo, la invención, una docena de años después de la muerte de Galileo, de la bomba de aire, que permite extraer el aire de una cámara y crear un vacío (imperfecto), permitió a varios científicos, entre ellos Robert Boyle en Inglaterra y Willem's Gravesande en los Países Bajos, contrastar experimentalmente la afirmación de Galileo

de que los cuerpos de peso distinto caen simultáneamente en el vacío.

Otras demostraciones, de menor exactitud científica, de la caída libre de los cuerpos en el vacío siguieron siendo populares incluso en el siglo XVIII, cuando la nueva física que había inaugurado Galileo ya había reemplazado al marco aristotélico. Por ejemplo, el rey Jorge III del Reino Unido insistió en que sus fabricantes de instrumentos escenificaran una demostración con una pluma y una moneda de una guinea que cayeran al mismo tiempo en un tubo en el que se hubiera hecho el vacío. Un observador escribió:

El Sr. Miller... solía decir que deseaba explicar el experimento de la cámara de vacío, la guinea y la pluma al rey Jorge III. Al escenificar el experimento, el joven óptico aportó la pluma y el rey, la guinea, y cuando concluyó el rey alabó al joven por su habilidad como experimentador y, no sin ruindad, devolvió la guinea al bolsillo de su chaleco³⁴.

Incluso ya entrado el siglo XX, hubo todavía científicos que experimentaron con la caída libre de los cuerpos, midiendo los tiempos exactos de caída para poner a prueba las ecuaciones de la aceleración de los cuerpos en un medio que ofrezca resistencia. Uno de estos experimentos se realizó hace relativamente muy poco tiempo, en la década de 1960, en la torre meteorológica del Laboratorio Nacional Brookhaven, en Long Island (Nueva York), bajo la dirección del físico teórico Gerald Feinberg. «La principal razón

³⁴ Christopher Hibbert, *George III: A Personal History*, Basic Books, Nueva York, 2000, p. 194.

para resucitar una cuestión que lleva mucho tiempo resuelta», escribió Feinberg, «es que los resultados de la teoría son contrarios al sentido común, o al menos a la intuición de quien ha crecido con las leyes de Galileo». Las ecuaciones utilizadas durante cientos de años todavía necesitaron algunas correcciones³⁵. Al parecer el experimento de la torre inclinada aún puede darnos sorpresas.

El experimento de la torre inclinada aborda una cuestión fundamental: el modo en que todos los objetos, desde las balas de cañón a las plumas, responden a la influencia de una fuerza que nos afecta a todos. Su diseño es increíblemente sencillo, sin trucos ni triquiñuelas; ¡ni siquiera hace falta un reloj! Y además es definitivo, nos deja con cierto tipo de placer, el de lo que podríamos llamar «sorpresa esperada». Aunque comprendemos la verdad en el marco galileano, nuestra vida cotidiana transcurre en un marco aristotélico. Si viviéramos en la Luna, donde no hay aire que oponga resistencia, el comportamiento de la caída de los objetos en el vacío nos resultaría familiar y el experimento no ejercería ningún poder de revelación. Pero nuestra experiencia diaria nos lleva a esperar que los cuerpos se comporten del modo descrito por Aristóteles, y así nos los muestra en ciertas situaciones. Cuando sostenemos objetos pesados, notamos su peso en las manos empujándonos con más fuerza hacia el suelo que los objetos ligeros, y eso nos da la sensación de que deberían caer más rápido, como si quisieran volver al lugar al que pertenecen. Por esta razón, todavía podemos

³⁵ Gerald Feinberg, «Fall of Bodies Near the Earth», *American Journal of Physics* 33 (1965), pp. 501-503.

deleitarnos al ver cómo se viola ese marco conceptual, y esa experiencia refuerza lo que ya sabemos intelectualmente. El placer que esto produce recuerda el juego de *fort-da* descrito por Freud, en el que un niño hacía que un pequeño objeto desapareciera y luego volviera a aparecer ante sus ojos; algo hacía que el niño se regocijara continuamente ante el retorno del objeto, aunque «sabía» que estaba allí todo el tiempo.

Hasta hace poco, varios misterios rodeaban los experimentos de Galileo sobre la caída de objetos. Uno de éstos se refiere a su observación, en *Sobre el movimiento*, de que al dejar caer un cuerpo menos denso, se desplaza primero por delante del más denso, que finalmente lo alcanza. En la década de 1980 el historiador Thomas Settle replicó los experimentos de Galileo con la ayuda de un psicólogo experimental y, para su sorpresa, notó lo mismo. Al investigar sobre ello, Settle llegó a la conclusión de que el objeto más pesado hace que se fatigue más la mano que lo sostiene y esto determina que el experimentador lo suelte más despacio aunque piense que deja caer los dos objetos al mismo tiempo³⁶.

Otro misterio que se ha aclarado hace poco concierne a la validez del relato de Viviani y a la razón por la cual Galileo no menciona en sus escritos el experimento de la torre inclinada si realmente se produjo. En los años setenta del pasado siglo, el estudioso de Galileo Stillman Drake examinó con sumo cuidado la correspondencia de Galileo de 1641-1642. Ciego y en arresto domiciliario, Galileo hacía que Viviani le leyera la correspondencia y

³⁶ Thomas B. Settle, «Galileo and Early Experimentation», *op. cit.*, pp. 3-21.

escribiera las respuestas. A principios de 1641 Galileo recibió varias cartas de su antiguo amigo y colaborador Vincenzo Renieri, que acababa de ser nombrado profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa, donde ocupaba la cátedra que antaño había ocupado el propio Galileo. En una de las cartas Renieri relata un experimento en el que había soltado dos bolas, una de madera y otra de plomo, «desde lo alto del campanario de la catedral», o sea, la famosa torre inclinada. No tenemos la respuesta de Galileo, pero la siguiente misiva de Renieri deja claro que Galileo le refería en ella a sus propios experimentos sobre la caída de los cuerpos tal como los describe en *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias* y le pedía a Renieri que repitiera el experimento con cuerpos de distinto peso pero hechos del mismo material, para ver si la elección del material afectaba a los resultados (no fue así). La carta de Renieri, además, al parecer tuvo el efecto de refrescarle la memoria a Galileo acerca de sus propios experimentos en Pisa, que había realizado con objetos del mismo material y que debió describir a Renieri o por lo menos a Viviani. Esto explicaría que Viviani hubiera tenido conocimiento de una historia que Galileo había olvidado hacía tiempo, y por qué Viviani, en su propio relato, especifica que Galileo había utilizado bolas del mismo material. Las historias de Viviani contienen errores, pero por lo general se trata de pequeños errores de cronología, énfasis o síntesis. Además, ¿por qué habría de citar Galileo la torre inclinada en sus escritos? Menciona «lugares elevados», y el hecho de que uno de esos lugares fuera la torre inclinada habría sido un aspecto secundario del experimento sin

ninguna influencia sobre la validez de los resultados. Tras reflexionar sobre ello, Drake llega a la conclusión de que, en su carta a Renieri, Galileo probablemente describiera un experimento sobre la caída de los cuerpos que habría realizado en la torre inclinada y que habría estado en el origen de la historia de Viviani³⁷. El destacado historiador I. Bernard Cohen llegó a hartarse de responder «no lo sé» a las preguntas de si alguien había soltado alguna vez dos bolas de distinto peso desde la torre inclinada de Pisa y de qué ocurriría si alguien lo hiciera. En una reunión del Congreso Internacional de Historia de las Ciencias de 1956, que se celebró en varias localidades de Italia, entre ellas Pisa, realizó una visita a la torre inclinada, pidió a algunos colegas y doctorandos que apartaran a los paseantes de un lugar en la base de la torre y subió los pisos inclinados por las resbalosas y gastadas escaleras de mármol. Cuando llegó arriba estiró los brazos, no sin cierta dificultad, por fuera del borde del lado sur de la torre y dejó caer dos bolas de distinto peso. Golpearon el suelo casi al mismo tiempo, ¡cloc!, ¡cloc!, ante un público embelesado, no porque presenciara algo inesperado, sino, al menos en parte, porque sabía que aquello tenía un significado histórico: era el famoso experimento de Galileo y la torre inclinada, realizado quizá por vez primera.

Interludio

³⁷ Stillman Drake, *Galileo at Work: His Scientific Biography*, University of Chicago Press, Chicago, 1978. Véase también Michael Segre, «Galileo, Viviani and the Tower of Pisa», *Studies in the History and Philosophy of Science* 20 (1989), pp. 435-451. Estoy en deuda con Thomas Settle por su ayuda con este capítulo y el siguiente.

Experimentos y demostraciones

Michelle recrea el experimento de Galileo en la torre inclinada de Pisa. Éste es el título de una escultura de tamaño real que se encuentra en el Museo de la Ciencia de Boston. Michelle es una niña afroamericana preadolescente vestida con bata. Ha apilado dos cajones encima de una cómoda y, subida a ellos, sostiene con los brazos en cruz una pelota blanda de béisbol de color rojo en la mano izquierda y una pelota de golf amarilla en la derecha. Está a punto de dejarlas caer cuando su madre entra y la observa con una mirada de desaprobación. La madre de Michelle piensa, según nos dice el bocadillo de cómic situado sobre su cabeza: «¿Qué está pasando aquí?!», mientras que Michelle piensa: «¿Cuál de las dos llegará primero al suelo?». En un texto al pie se lee:

¿Cómo se desplazan los cuerpos al caer? ¿Golpeará el suelo la pelota de béisbol antes que la de golf? Michelle, como Galileo hace 400 años, quiere verlo por sí misma... «Lo veré por mí misma». Eso es lo que uno dice cuando no quiere simplemente creer lo que cuentan.

Esta escultura denota la sencillez conceptual del experimento de Galileo en la torre inclinada, expresa hasta qué punto se ha hecho legendario, pone de manifiesto algunas de las simplificaciones de la leyenda e ilustra algunas de las diferencias entre los experimentos y las demostraciones.

Michelle está realizando un experimento, un tipo de representación que revela algo por primera vez. Escenificamos una representación

cuando algo que nos parece importante clarificar no puede clarificarse leyendo más sobre el asunto: para avanzar en nuestra indagación, tenemos que planear, ejecutar, observar e interpretar una acción. En un experimento no sabemos qué ocurrirá al final. Esta incertidumbre hace que pongamos mucha atención en la representación. Cuando el experimento por fin nos muestra lo que hace, no es como conocer la respuesta a una pregunta de elección múltiple porque nos transforma aunque todavía no sepamos cuál será nuestro siguiente paso. Ésta es una de las diferencias que señala Hardy al comparar el ajedrez y las matemáticas; una partida de ajedrez no puede cambiar las reglas del juego mientras que una prueba matemática, o un experimento científico, cambia la ciencia, pues abre un resquicio por el que se cuele algo nuevo. Es precisamente por eso por lo que nuestra indagación no se acaba, sino que sale modificada y más profunda.

De algún modo, Michelle se ha interesado en la caída de los cuerpos. El porqué no lo sabemos y es difícil de imaginar; es probable que haya leído algo sobre Galileo que la haya intrigado. Se lo ha tomado lo bastante en serio como para escenificar una pequeña actuación, con ingredientes que le son familiares, para indagar sobre lo que la intriga. También nos damos cuenta de que, encuentre lo que encuentre, sus preguntas no se acabarán ahí.

Un experimento recapitulado se convierte en una demostración, una exhibición. Así como un experimento es una representación cuyos actores y público son los mismos, pues está diseñado para revelar algo ante quienes lo ponen en escena y ante su comunidad, una

demostración es una representación corriente en la que público y actores son distintos. Si Galileo en efecto dejó caer alguna vez bolas de distinto peso desde lo alto de la torre inclinada de Pisa, debió de ser en todo caso una demostración destinada no tanto a revelar algo para sí mismo como a convencer a otros. Los experimentos fundamentales de hoy se convierten en las demostraciones de mañana. Una demostración es una recapitulación con un propósito y su escenificación dependerá de ese propósito (inspirar a una clase, convencer a unos colegas, impresionar a unos periodistas). La línea que separa a los experimentos de las demostraciones no siempre es precisa porque al preparar y calibrar un nuevo experimento uno a menudo llega a conocer aquello que será revelado antes de que el experimento comience «oficialmente». Los experimentadores astutos saben aprovechar ese conocimiento para mejorar el experimento. Por otro lado, las demostraciones no siempre se desarrollan según lo planeado, por ejemplo cuando son perturbadas por fuerzas conocidas y mundanas o cuando de forma inadvertida interviene algo nuevo que uno no comprende.

Cuando visitamos un museo de la ciencia, lo que vemos son demostraciones. La pieza de exhibición de la caída de los cuerpos en el Museo de la Ciencia de Boston contiene dos cilindros de plexiglás, uno al lado del otro, dentro de los cuales hay unas garras mecánicas que pueden recoger objetos de distinto peso insertados en la base, alzarlos hasta lo más alto y dejarlos caer al unísono. Por medios electrónicos se sigue la trayectoria de los dos objetos al desplazarse por el cilindro. Los niños suelen buscar por el suelo de

la habitación todo tipo de objetos que insertar en la máquina para el placer de los conservadores y enojo del equipo de mantenimiento. El Exploratorium de San Francisco tiene una demostración distinta que consiste en un cilindro de plexiglás de 1,2 metros montado sobre un eje de manera que puede invertirse. Dentro del cilindro se encuentran dos objetos, una pluma y algún tipo de juguete, como un pollo de goma, y está conectado a una bomba de vacío que el visitante del museo puede encender o apagar. Los dos objetos son recogidos por una pequeña plataforma cuando empieza a rotar el cilindro y caen de la plataforma cuando se le ha dado la vuelta por completo al cilindro. Cuando se permite la entrada de aire en el cilindro, la pluma se queda rezagada en la caída y tarda varios segundos en llegar abajo; en cambio, cuando se extrae el aire del cilindro, los dos objetos caen juntos. La demostración es tan popular que el visitante del museo invariablemente tiene que hacerse paso entre una muchedumbre de niños para poder jugar.

Las demostraciones tienden a enmascarar la dificultad de concebir, ejecutar y comprender los experimentos, creando una distancia entre el público y el fenómeno que no está presente en los experimentos. Las demostraciones también pueden simplificar enormemente el proceso experimental al utilizar equipos modernos contruidos con la respuesta «correcta» en mente, aun cuando estén amañados para producir resultados un tanto imperfectos para que resulten más verosímiles.

Las demostraciones, las descripciones en libros de texto y las simulaciones pueden incluso dar una imagen errónea de la ciencia

al promover la sensación de que un experimento científico no es más que una ilustración de una lección ya formulada más que un *proceso*. Se convierte de este modo al experimento, por así decirlo, en una especie de obra maestra de pintura por números. Por ello, las demostraciones pueden restar belleza a la ciencia. Aunque un experimento científico ponga de manifiesto un hecho simple, escribió el historiador Frederic Holmes, está extraído de una «matriz de complejidad» e inevitablemente introduce nuevas dimensiones de complejidad³⁸. Así fue también en el caso del experimento de la torre inclinada: llevó mucho tiempo a los científicos comprender la enormidad de los experimentos sobre la caída de los cuerpos, que no hicieron la ciencia más simple, sino más compleja.

La escenificación de la caída de una pluma por la misión del *Apolo 15* fue, como es obvio, una demostración. Como experimento (si no es para la más rudimentaria de las exploraciones) hubiera sido inexcusablemente chapucero. Nadie midió la altura desde la que se dejaron caer los objetos. A nadie le importó que Scott estuviera inclinado y no mantuviera los brazos paralelos al suelo. No se hizo nada para asegurarse de que los dos objetos se soltaban al mismo tiempo. Nadie midió el tiempo de la caída. Como el comandante Scott dio a entender («Al parecer una de las razones por las que estamos aquí tiene que ver con un caballero llamado Galileo...»), los científicos ya conocían la fuerza de la gravedad de la Luna y el comportamiento de los objetos durante la aceleración. Si hubieran

³⁸ Galileo, *Two New Sciences*, tr. S. Drake, *op. cit.*, pp. 169-170.

albergado la más mínima duda sobre cualquiera de estas dos cosas, ¡hubiera sido poco aconsejable enviar una nave tripulada a la Luna! Incluso como demostración, la escena de la pluma escenificada por la misión del *Apolo 15* a punto estuvo de acabar mal. En una prueba realizada unos momentos antes, el comandante Scott descubrió con horror que la carga estática hacía que la pluma se quedara adherida a sus guantes. Casi de milagro, la demostración funcionó a la perfección cuando se encendió la cámara. Por suerte, porque gracias a lo exótico de la localización, la cobertura televisiva y el vídeo que la NASA ha colgado en su sitio web, el experimento del *Apolo 15* se ha convertido en la exhibición científica más vista de toda la historia.

Capítulo 3

El experimento alfa

Galileo y el plano inclinado



Plano inclinado con campanas, una pieza de demostración didáctica del siglo XVIII conservada en el Museo de la Ciencia de Florencia (Italia). El péndulo situado en la parte posterior estaba diseñado para producir un tañido al final de cada oscilación, marcando así intervalos de tiempo iguales, y a lo largo del plano hay unas pequeñas campanas movibles que al pasar la bola producen también un sonido. La persona encargada de hacer la demostración podía, por prueba y error, colocar las campanas movibles de tal manera que una bola, al rodar por el plano, las hiciera sonar en sincronía con los sonidos producidos por el péndulo. Tras medir la distancia desde el inicio de la caída y entre las posiciones de las campanas, el presentador (y la audiencia) descubrían que las distancias recorridas en períodos de tiempo iguales y sucesivos formaban la serie de

números impares desde el uno; o, lo que es lo mismo, que las distancias totales recorridas eran proporcionales a los cuadrados de los tiempos totales. Aunque este plano ilustra la Ley de Galileo, no está probado que Galileo llegara a construir una versión del plano inclinado de este tipo.

Los profesores de ciencia lo llaman experimento «alfa» porque a menudo es el primer experimento que aprenden los estudiantes en la clase de física. En muchos sentidos es el primer experimento científico moderno en el que un investigador de manera sistemática planeó, escenificó y observó una serie de acciones con el fin de descubrir una ley matemática.

Este experimento, que Galileo realizó con éxito en 1604, introdujo el concepto de aceleración: la tasa de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. Si el experimento de la torre inclinada de Pisa fue una demostración surgida de los estudios de Galileo que indicaban que la caída libre de los cuerpos es independiente de su peso siempre que encuentren poca resistencia, el experimento del plano inclinado fue una demostración surgida de los estudios de Galileo sobre la caída libre que ilustraba la ley matemática implicada. También este experimento ha estado rodeado de misterio porque las afirmaciones realizadas por Galileo a raíz del mismo parecían demasiado precisas para el equipo del que disponía. No obstante, al igual que en el caso del experimento de la torre inclinada, las investigaciones históricas más recientes han sacado a la luz algunas sorpresas que han transformado nuestra imagen de

Galileo como experimentador. ¿Qué es lo que ocurre cuando se suelta un objeto para que caiga libremente? ¿Va ganando velocidad de una forma suave? ¿Salta inmediatamente hasta una velocidad uniforme «natural»? ¿Realiza algún tipo de transición hasta alcanzar una velocidad uniforme? Si estas preguntas despiertan nuestro interés, podemos intentar ver qué pasa cuando, por ejemplo, dejamos caer una moneda o una bola desde la mano. El problema es que esos cuerpos caen demasiado rápido como para poder observarlos bien. ¿Cómo podríamos disponer las cosas para poder ver lo que pasa con más precisión?

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, Aristóteles había examinado cuerpos en movimiento y había llegado a la conclusión, al parecer tras observar la caída de cuerpos en el agua, de que la velocidad de un cuerpo al caer libremente es uniforme y proporcional a su peso y que, si no hubiera un medio que opusiera resistencia, se haría infinita.

Galileo, sin embargo, llegó a la convicción de que observar la caída de cuerpos en un líquido oscurece el problema en lugar de clarificarlo. Al igual que Aristóteles, encontró que era demasiado difícil seguir la trayectoria de caída de los cuerpos de manera directa porque el ojo no es lo bastante rápido y los instrumentos para medir el tiempo disponibles en la época no eran lo bastante precisos para intervalos cortos. En lugar de hacer más lenta la caída de los cuerpos haciendo que caigan por un medio más denso, a Galileo se le ocurrió diluir, por así decirlo, la influencia de la gravedad sobre el movimiento haciendo rodar bolas por planos

inclinados. De este modo, pensó, quizá se lograra abordar en la práctica el estudio de la caída libre. Si el plano inclinado tiene poca pendiente, la bola cae despacio; si se aumenta la pendiente, la bola rueda más rápido. Cuanto mayor sea la inclinación, más se acercará la caída de la bola a la caída libre. Midiendo la tasa de descenso de las bolas por planos inclinados de distinta pendiente y relacionando después estas tasas con el grado de inclinación, Galileo esperaba resolver la cuestión de la caída libre de los cuerpos (figura 3.1).

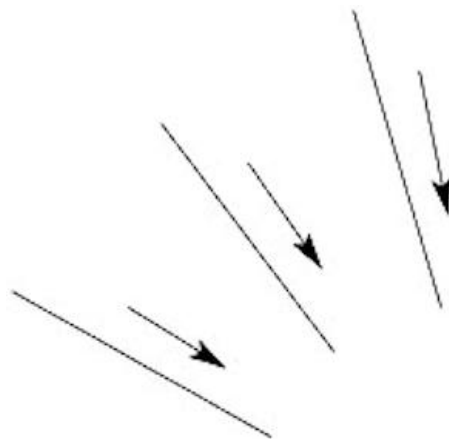


Figura 3.1. Cuanto más inclinado sea el plano, más se acerca el movimiento de la bola al movimiento de caída libre.

En 1602 Galileo ya había construido planos inclinados en los que había hecho unos surcos rectos a modo de carriles y había intentado medir la velocidad con la que las bolas rodaban por ellos. Sin embargo, no logró obtener resultados útiles. Intentó entonces experimentar con péndulos, y de ellos aprendió mucho, pues el movimiento a lo largo del arco de un círculo vertical está

relacionado con el movimiento sobre un plano inclinado. Pero una vez más fue incapaz de conseguir los resultados que buscaba. Comenzó a darse cuenta del papel de la aceleración, del hecho de que un cuerpo al caer comienza despacio y va ganando en velocidad, y poco a poco se fue afianzando en él la determinación de darle una descripción matemática.

Los cuadernos de notas y la correspondencia de Galileo muestran que en 1604 había descubierto por fin la ley de la aceleración que buscaba gracias a sus investigaciones sobre el movimiento en planos inclinados: la distancia recorrida por un objeto depende del cuadrado del tiempo durante el que se acelera. Si el tiempo se incrementa siguiendo una progresión simple (1, 2, 3...), la distancia recorrida por el objeto en cada uno de los intervalos sucesivos será la progresión de números impares (1, 3, 5...). Esto equivale a lo que hoy se conoce como Ley de Galileo, $D \propto T^2$: La distancia recorrida desde su punto de partida por un cuerpo que se mueve con aceleración uniforme es proporcional al cuadrado del intervalo de tiempo transcurrido desde el inicio del desplazamiento (la ecuación moderna es $d = \frac{1}{2}at^2$, es decir, la distancia recorrida por un objeto es igual a la mitad de su aceleración multiplicada por el tiempo transcurrido elevado al cuadrado). Galileo descubrió también que esta misma ley era cierta con independencia del ángulo de inclinación, y concluyó que la ley que describe la aceleración de los cuerpos que se deslizan por un plano inclinado se cumple no sólo para los cuerpos en caída libre, sino para cualquier objeto que experimente aceleración, tanto si se mueve hacia arriba como si se

desplaza hacia abajo. (Galileo no se percató de que el movimiento de una bola al rodar es ligeramente distinto del de un objeto que se deslice. Ambos se aceleran de manera uniforme y de acuerdo con su ley, pero la constante de aceleración es diferente y ganan velocidad con una tasa distinta porque en el caso de la bola, parte de la energía se invierte en el momento angular).

Fue un descubrimiento trascendental. Para empezar, lo que hizo Galileo suponía cambiar el centro de atención de los científicos que estudiaban el movimiento. Hasta entonces, la velocidad se medía en función del espacio, del terreno recorrido. Galileo fue el primero en darse cuenta de que la variable independiente a la que había que prestar atención era el tiempo, no el espacio. Nosotros estamos tan acostumbrados a pensar así que nos parece natural, pero no lo es, o por lo menos no lo era en aquellos tiempos. Pero aún más importante es que Galileo demostró que no existía diferencia alguna entre el movimiento «violento», hacia arriba, y el movimiento «natural» o hacia abajo. En ambos casos se trataba de objetos sujetos a aceleración, y por lo tanto la misma ley matemática describía su movimiento. Con relación al resto de la obra científica de Galileo, esto significaba que el sistema de Aristóteles no se podía arreglar, que había que reemplazarlo.

Galileo hizo pública su ley en su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* (1632). Pero su breve explicación no bastó para convencer a algunos de sus contemporáneos, quienes se quejaron de no lograr obtener los mismos resultados. En respuesta a sus críticos, Galileo elaboró su explicación en su siguiente obra,

Diálogos acerca de dos nuevas ciencias. En el Tercer Día, tras escuchar como Salviati, el personaje que representa a Galileo, menciona la Ley de Galileo, Simplicio, el aristotélico, objeta:

Pero todavía guardo dudas sobre si ésta es la aceleración de la cual se sirve la naturaleza en el movimiento de caída de los cuerpos pesados. Por eso, para que lo comprenda yo y otros como yo, me parece que sería oportuno en este lugar aducir algún experimento de entre los muchos que se ha dicho que existen, que en varios casos concuerde con las conclusiones demostradas.

Salviati considera que la petición es razonable y tras decir que, en efecto, él mismo ha realizado los experimentos y que confirman la ley en cuestión, le describe a Simplicio el aparato:

En un tablón o viga corrientes, de madera, de una longitud de unos doce brazos, medio brazo de ancho y unos tres dedos de grosor, se practicó, a lo largo de la más estrecha de estas dimensiones, un canal de poco más de un dedo de ancho y muy recto, y para tenerlo bien limpio y liso se encoló en su interior una tira de papel vitela tan liso y limpio como fue posible, y por él se hacía descender una bola de bronce muy duro, bien redondeada y pulida, después de inclinar dicho tablón elevando sobre el plano horizontal uno de sus extremos entre uno y dos brazos, según se quisiera. Se dejaba (como digo) descender por dicho canal la bola, anotando, del modo que enseguida diré, el tiempo que consumía en recorrerlo entero, repitiendo el mismo proceso muchas veces para asegurarse bien de la cantidad de

tiempo, en la cual no se apreciaba nunca una diferencia ni de la décima parte de un latido del pulso.

Salviati le dice a Simplicio, por ejemplo, que hizo rodar la bola una cuarta parte de la longitud del canal y halló que tardaba en recorrerlo justo la mitad del tiempo, y que en otras ocasiones el lapso transcurría de acuerdo con la misma relación matemática. «Mediante experimentos repetidos un centenar cumplido de veces», dice, «siempre se encontraba que los espacios transcurridos eran entre ellos como el cuadrado del tiempo, y esto para todas las inclinaciones del plano, es decir del canal por el cual se hacía descender la bola». Esto es lo que hoy denominamos Ley del Movimiento Uniformemente Acelerado.

Simplicio queda convencido: «Me hubiera dado gran satisfacción encontrarme presente en esos experimentos; pero estando seguro de vuestra diligencia al realizarlos y vuestra fidelidad al referirlos, me tranquilizo y los admito por segurísimos y verdaderos³⁸».

El experimento de Galileo es diferente de la medición de la circunferencia de la Tierra por Eratóstenes y del propio experimento de Galileo de la torre inclinada. Estos últimos aprovechaban unas instalaciones construidas con otros propósitos. En cambio, el experimento del plano inclinado exigió el diseño y la construcción de un equipo particular con una función específica. El ingenio de Galileo no se limitó a la realización del experimento sino también al diseño del «escenario» que lo hizo posible. Este escenario crea un espacio para la representación en el que un fenómeno (la

aceleración, en este caso) puede aparecer y ser estudiado. Incluso un fenómeno nuevo e inesperado: el propio manuscrito de Galileo *Sobre el movimiento* demuestra que comenzó a utilizar planos inclinados cuando todavía pensaba que los cuerpos caían o rodaban con un movimiento uniforme. Una vez Galileo hubo diseñado este escenario, otros podían replicarlo y realizar en él sus propias representaciones, del mismo modo que un autor teatral escribe un texto que otros escenifican. Pues aunque este experimento requiere que se le construya un escenario propio, aún se parece a la medición de la Tierra por Eratóstenes y al experimento de la torre inclinada en que puede realizarse de infinidad de maneras.

En otro tiempo, los historiadores creían que, en efecto, Galileo había descubierto la Ley del Movimiento Uniformemente Acelerado, pero eran más escépticos que Simplicio acerca de la fidelidad con la que había referido el experimento. Su principal objeción tenía que ver con el modo en que Galileo medía el tiempo. El dispositivo que utilizaba era un cronómetro de agua que se basaba en la medición de la cantidad de líquido que fluía por un pequeño tubo durante el descenso para deducir de aquí el tiempo transcurrido. Estos cronómetros pueden resultar difíciles de usar con precisión para intervalos cortos. De hecho, hasta hace poco muchos historiadores no sólo no creían a Galileo sino que lo ridiculizaban por afirmar que había utilizado este mecanismo para medir «la décima parte de un latido del pulso», o aproximadamente la décima parte de un segundo. Uno de los críticos más abiertos fue Alexander Koyré de la École des Hautes Études de París, un especialista en Galileo. Koyré

veía la ciencia desde una perspectiva platónica de acuerdo con la cual ésta progresaba por medio del razonamiento teórico y los experimentos eran «teoría encarnada», y este prejuicio guió su lectura de la obra del italiano. Sólo tomaba en serio los argumentos lógicos y matemáticos de Galileo mientras que desdeñaba su trabajo experimental. En 1953, por ejemplo, Koyré escribió sobre «la sorprendente y lamentable pobreza de los medios experimentales de los que disponía [Galileo]», y se burlaba del experimento del plano inclinado en los siguientes términos:

¡Una bola de bronce deslizándose por un canal de madera «lisa y pulida»! Un recipiente con un pequeño orificio por el que fluye el agua que se recoge en un pequeño vaso para pesarla después y medir así el tiempo de descenso... ¡qué cúmulo de fuentes de error e inexactitud!... Es obvio que los experimentos de Galileo son del todo inútiles: la sola perfección de sus resultados constituye una prueba rigurosa de su incorrección³⁹.

En un franco desafío a las tesis de Koyré, Thomas Settle, un pobre y esforzado estudiante de doctorado en historia de la ciencia por la Universidad de Cornell reconstruyó el experimento con suma meticulosidad en 1961 en la sala de estar del piso que compartía con otro estudiante de doctorado. Settle decidió utilizar únicamente «equipos y procedimientos de los que pudiera disponer Galileo o que no fueran inherentemente mejores que los que él hubiera podido

³⁹ Alexandre Koyré, «An Experiment in Measurement», *Proc. American Philosophical Society* 97 (1953), pp. 222-236.

obtener». Escogió un tablón largo de pino, una serie de bloques de madera, una maceta con el fondo atravesado por un pequeño tubo de vidrio y un cilindro graduado (el medidor de tiempo), además de dos tipos de bola: una bola de billar de 5,7 centímetros y una bola de rodamiento de 2,2 centímetros. Lograr que el experimento funcionara le llevó cierta práctica; Settle descubrió que el operador «tiene que dedicar un tiempo a familiarizarse con el equipo, con el ritmo del experimento. Tiene que entrenar conscientemente sus reacciones. Y cada día, o al final de cada descanso, tiene que realizar unas cuantas ejecuciones de prueba a modo de calentamiento». Como Koyré había sugerido, medir el tiempo del descenso era realmente el aspecto «más difícil» del trabajo. Con todo, al final Settle logró obtener datos excelentes que concordaban con la Ley de Galileo y concluyó que el experimento de Galileo «sin lugar a dudas era técnicamente posible para él», e incluso descubrió que, con práctica, podía hacer que su cronómetro de maceta alcanzara la precisión de una décima de segundo que afirmaba haber logrado el físico y astrónomo. Settle publicó su reconstrucción en la revista *Science* con los diagramas y tablas de datos pertinentes (figura 3.2). Pese a alguna bravata de estudiante de doctorado en el sentido de que replicar el experimento «en esencia tal y como lo describe Galileo» es «simple, sencillo y fácil de ejecutar», su artículo sigue siendo una excelente guía sobre él⁴⁰.

El trabajo de Settle estableció que el experimento del plano inclinado realmente podía demostrar la Ley del Movimiento

⁴⁰ Thomas B. Settle, «An Experiment in the History of Science», *Science* 133 (1961), pp. 19-23.

Uniformemente Acelerado, pero muchos historiadores siguieron pensando que Galileo no podía haber experimentado del modo que él mismo describe, que no podía haber utilizado ese método para establecer sus conclusiones. Estos historiadores suponían que Galileo primero había descubierto la ley matemática mediante algún tipo de razonamiento abstracto y luego había construido su dispositivo para demostrarla experimentalmente. La razón de su escepticismo era, una vez más, el cronómetro de agua; no creían que hubiera podido establecer la ley con su ayuda.

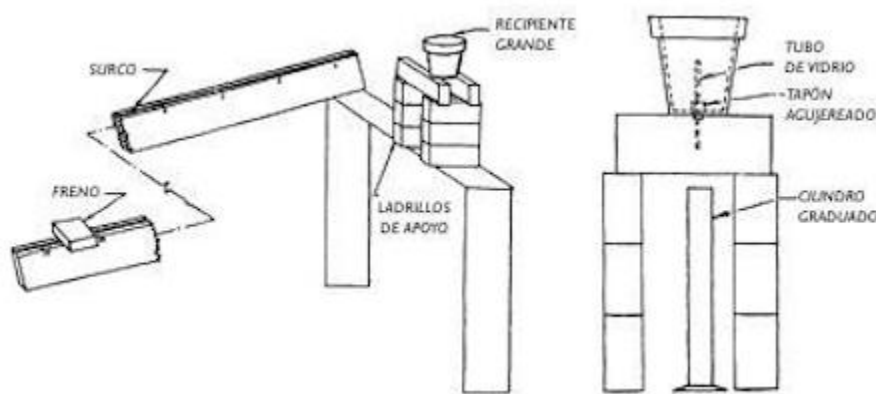


Figura 3.2. Diagrama del aparato de Thomas Settle para recrear el experimento de Galileo con el plano inclinado.

En los años setenta del siglo XX el estudioso de Galileo Stillman Drake puso en tela de juicio esta suposición. Mediante el estudio meticuloso de una página del cuaderno de notas de Galileo, Drake llegó a la conclusión de que éste realmente había alcanzado a enunciar la ley gracias al método experimental del plano inclinado, pero que lo había hecho midiendo el tiempo de una manera que sacaba partido de su sólida formación musical. Galileo era un

intérprete de laúd competente y podía seguir un compás con mucha precisión. Un buen músico podía fácilmente tañer un ritmo con una precisión mayor que aquella que podía medir un cronómetro de agua. Drake determinó que Galileo había dispuesto trastes en el surco del plano inclinado, cuerdas de tripa movibles como las que se utilizaban en los antiguos instrumentos de cuerda. Cuando la bola rodaba por el canal y pasaba por encima de un traste, producía un leve chasquido. Según la reconstrucción especulativa de Drake, Galileo habría ajustado las posiciones de los trastes de modo que una bola que rodara desde lo alto golpeará los trastes con un tempo regular, que para las canciones típicas de la época debía de ser de un poco más de medio segundo por pulso. Una vez marcados unos intervalos de tiempo bastante exactos gracias a su conocimiento de la música, todo lo que Galileo tenía que hacer era medir las distancias entre los trastes. Éstas crecían a medida que la bola ganaba en velocidad, ilustrando así la progresión 1, 3, 5..., lo que permitió al italiano componer el experimento más elaborado que describe en *Dos nuevas ciencias* y que reconstruyó Settle.

En suma, Galileo fue un experimentador más habilidoso e ingenioso de lo que suponían los historiadores.

El experimento del plano inclinado de Galileo tiene un tipo de belleza particular. Carece de la amplitud del experimento de Eratóstenes, en el que unas dimensiones cósmicas aparecen en una pequeña sombra. Tampoco tiene la dramática simplicidad del experimento de la torre inclinada, en el que un contraste entre dos visiones del mundo radicalmente distintas queda cristalizado en

una demostración que puede percibirse a simple vista. Y, por supuesto, la belleza del experimento del plano inclinado no reside en la ley matemática del movimiento acelerado que descubrimos gracias a él, del mismo modo que la belleza de un Monet o un Cézanne no reside en el pajar o la montaña pintados. La belleza del experimento del plano inclinado reside más bien en el modo como permite que «emerja una pauta», en la forma dramática en que un aparato relativamente simple permite que un principio fundamental de la naturaleza se manifieste en lo que a primera vista es una serie caótica y desordenada de eventos: unas bolas que ruedan por una rampa. Así es como la ley apareció ante los ojos de Galileo y así es como se demuestra hoy ante los estudiantes.

Una de las personas que respondieron a mi encuesta describía así su experiencia con la reconstrucción de los experimentos de Galileo: «La belleza no estaba en aprender que la gravedad es $9,8 \text{ m/s}^2$, sino en ver que a partir de un dispositivo bastante sencillo se podía medir cuantitativamente una cantidad importante de la física».

Interludio

La comparación entre Newton y Beethoven

En una ocasión, después de interpretar la última sonata para piano de Beethoven, el *Opus 111*, para unos amigos en una fiesta, Werner Heisenberg declaró ante su arrobada audiencia: «Si yo no hubiera vivido, lo más probable es que otro hubiera formulado el principio

de la indeterminación. Si Beethoven no hubiera vivido, nadie hubiera escrito el *Opus 111*⁴¹».

En la misma línea, el historiador I. Bernard Cohen cita un comentario atribuido a Einstein: «Aunque Newton o Leibniz nunca hubieran vivido, el mundo hubiera tenido el cálculo, pero si Beethoven no hubiera vivido, nunca hubiéramos tenido la *Sinfonía en do menor* [la Quinta]⁴²».

La comparación entre Newton y Beethoven, como a menudo se la llama, establece una elegante relación entre las ciencias y las artes con profundas implicaciones respecto a la posibilidad de belleza en la ciencia. El argumento suele contrastar las dos, afirmando que los productos de la ciencia son inevitables mientras que los de las artes no lo son. La suposición subyacente es que la estructura del mundo investigado por la ciencia está prefigurada y el trabajo de los científicos se dirige a revelar esa estructura ya existente. Es lo que los sociólogos de la ciencia llaman enfoque de la «pintura por números». Imaginación, creatividad, intereses del gobierno y factores sociales pueden afectar al momento en que se realiza algún desarrollo científico, a la rapidez y al orden con que se rellenan los colores, pero no pueden afectar a la estructura final del cuadro. Los artistas, en cambio, son plenamente responsables de la estructura global de sus obras.

⁴¹ Owen Gingerich, ed., *The Nature of Scientific Discovery*, Smithsonian Institution, Washington, D.C., 1975, p. 496.

⁴² I. Bernard Cohen, *Franklin and Newton*, American Philosophical Society, Philadelphia, 1956, p. 43.

Immanuel Kant también comparó a científicos y artistas, pero en otro sentido. Según este filósofo, pese al romanticismo con el que a menudo se rodea a científicos como Newton, el «genio» no se encuentra entre los científicos, que son capaces de explicar el porqué de lo que hacen a sí mismos y a otros, sino sólo entre los artistas. Los científicos pueden explicarle su trabajo a otros mientras que los artistas producen obras originales cuya creación es un secreto desconocido y no conocible. «Newton podía mostrar de qué modo había dado cada uno de los pasos para ir desde los primeros elementos de la geometría hasta sus grandes y profundos descubrimientos», escribió Kant, «no sólo a sí mismo sino a cualquier otra persona, con un razonamiento intuitiva[mente claro] que permitía a los otros seguirlo». No así con Homero y otros grandes poetas. «Uno no puede aprender a escribir poesía inspirada por muy elaborados que sean los preceptos de ese arte y por soberbios que sean sus modelos⁴³».

En oposición al contraste habitual, el científico Owen Gingerich hace una interesante defensa de la analogía, para lo cual utiliza un caso particular que muestra que los científicos son parcialmente responsables de la estructura de sus teorías, cuya forma general no estaría plenamente predeterminada por la naturaleza. De acuerdo con su argumentación, el sistema newtoniano del mundo no es inevitable, puesto que se pueden derivar explicaciones alternativas de los fenómenos celestes, en la forma de las leyes de Kepler, a

⁴³ Immanuel Kant, *Critique of Judgment*, tr. W. Pluher, Hackett, Indianapolis, 1987, sección 47. (Hay trad. cast.: *Crítica del juicio*, Espasa-Calpe, Pozuelo de Alarcón, 2005; y versión de libre acceso en la Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes).

partir de otras fuentes, como por ejemplo las leyes de la conservación.

La reafirmación de una alternativa permite a Gingerich resaltar el papel de la imaginación y la creatividad en el logro de Newton. Y concluye: «Los *Principia* de Newton son un logro personal que lo sitúa en la misma clase creativa que a Beethoven o a Shakespeare». No obstante, Gingerich advierte del peligro de llevar la analogía Newton-Beethoven demasiado lejos. «La síntesis de conocimiento que se alcanza en una gran teoría científica no equivale del todo a la ordenación de las partes de una composición artística», dice. La teoría científica tiene un referente en la naturaleza y está sujeta a «experimentación, ampliación y refutación». Los logros científicos pueden ser legítimamente, incluso inevitablemente, parafraseados (¿quién, aparte de los historiadores, lee hoy los *Principia*?) de un modo que no es posible con las obras de arte. Y la forma en que la ciencia progresa es diferente del progreso de las artes. Aun así, concluye Gingerich, un análisis cuidadoso de la analogía Newton-Beethoven —de la analogía y del contraste—, nos permite «adquirir una mayor sensibilidad con respecto a la naturaleza de la creatividad científica». Si las argumentaciones de Kant y el contraste tradicional parecían negar la posibilidad de la belleza de las teorías científicas, los argumentos de Gingerich recuperan un lugar para ella⁴⁴. En un experimento mental, el filósofo francés Jean-Marc-Lévy-Leblond trató de imaginar cómo podría haber sido la teoría de

⁴⁴ Owen Gingerich, «Circumventing Newton: A Study in Scientific Creativity,» *American Journal of Physics* 46 (1978), pp. 202-206.

la relatividad si Einstein no hubiera vivido. El resultado contiene términos, símbolos e ideas bastante distintos de los que hoy tenemos⁴⁵.

Si la cuestión no es la teoría sino la experimentación, la comparación Newton-Beethoven adquiere una dimensión nueva. La experimentación suele verse desde fuera como un proceso automático que requiere un impulso creativo mínimo. Desde esta perspectiva, la experimentación se asemejaría a *Concentration*, un concurso que se emitió en la televisión estadounidense entre 1958 y 1973. Los concursantes tenían que descubrir e interpretar lo que había detrás de las caras ocultas de una serie de bloques montados contra una pared. A medida que avanzaba el juego, los bloques se iban girando de uno en uno, revelando partes del jeroglífico compuesto por palabras y símbolos que los concursantes debían descifrar. Los bloques eran girados por unos técnicos entre bastidores, los «experimentadores», activando una maquinaria oculta. El proceso mecánico no guardaba ningún interés para los concursantes, que sólo prestaban atención a los datos que iban apareciendo en la superficie.

Como todo experimentador puede atestiguar, esta imagen es errónea. Nada en un experimento bien diseñado es automático o inevitable. Pero para comprender esto es necesario ver los experimentos como un proceso además de como un resultado. ¿Cómo llegó hasta allí el experimento? Entenderlo requiere una

⁴⁵ Jean-Marc Lévy-Leblond, «What If Einstein Had Not Been There? A *Gedankenexperiment* in Science History», 24th International Colloquium on Group-Theoretical Methods in Physics, París, julio de 2002.

historia, casi una biografía, con su concepción, su gestación, su crecimiento y, con suerte, su madurez con descendencia. En este proceso, sin duda, puede intervenir lo que Kant llamaba genio, para el que no existen reglas escritas de antemano.

Kant tenía razón al decir que el estilo y la tradición funcionan de forma distinta en las ciencias y en las artes. Los experimentos con prismas pueden remitir a Newton históricamente, como las mediciones de precisión a Cavendish, los experimentos de interferencia de la luz a Young o los experimentos de dispersión de partículas a Rutherford. Y los historiadores que estudian series largas de experimentos realizados por el mismo experimentador, por ejemplo Faraday, Volta, Newton o Franklin, a menudo logran identificar pautas características en la manera como estos científicos exploraban un fenómeno y diseñaban nuevos experimentos para entenderlo. Pero aun así no es posible reconocer un experimento como «un Newton» o «de estilo Newton» del mismo modo que puede reconocerse en un cuadro «un Caravaggio» o el «estilo Caravaggio». El trabajo experimental a menudo requiere un tipo distinto de ingenio, dependiente también de la imaginación y la creatividad, que no es inevitable y que crea su propia tradición de modelos al abrir nuevos dominios para la investigación.

La imaginación científica, como la imaginación artística, nace de la disciplina. Opera dentro de un conjunto determinado de recursos, teorías, productos, presupuesto y personal, y crea con estos elementos una escenificación que permite que se manifieste algo nuevo. Por supuesto, un presupuesto mayor o unos materiales

mejores facilitarían las cosas. Pero la imaginación experimental no mira al conjunto de recursos existentes por lo que limita sino por lo que permite. Como dijo Goethe: «Sólo en la limitación se revela la maestría». En este sentido, la analogía Newton-Beethoven es más una comparación que un contraste y define un lugar inequívoco para la belleza en la ciencia.

Capítulo 4

Experimentum crucis

Newton y la descomposición de los rayos de sol con prismas

En enero de 1672 Isaac Newton (1642-1727) envió una breve misiva a Henry Oldenburg, el secretario de un grupo de eminentes científicos (o «filósofos», como se los conocía entonces) que acababa de fundarse, la Real Sociedad de Londres. Tan sólo una semana antes la Sociedad había admitido a Newton, admirados sus miembros por su invención de un nuevo e ingenioso tipo de telescopio de reflexión. Lo que el matemático y físico británico comunicaba a Oldenburg era una afirmación audaz y descarada. He realizado un «descubrimiento filosófico», decía en su misiva, que era «en mi juicio la más singular, si no la más considerable revelación hasta hoy realizada sobre el funcionamiento de la naturaleza⁴⁶». Se podría haber excusado a Oldenburg si hubiera considerado esta afirmación ridícula, una expresión de arrogancia de un joven de ambición desmedida. Newton era una persona difícil: combativa, hipersensible y obsesivamente reservada. Pero su afirmación no era una hipérbole.

Unas pocas semanas más tarde, Newton enviaba a los miembros de la Real Sociedad la descripción de un experimento que demostraba de forma definitiva, según decía, que la luz del Sol, la luz blanca, no era pura como hasta entonces se creía, sino que estaba compuesta

⁴⁶ I. Newton a H. Oldenburg, 18 de enero de 1672, en W. Turnbull (ed.), *The Correspondence of Isaac Newton*, vol. I, University Press, Cambridge, 1959, pp. 82-83.

por una mezcla de rayos de diferentes colores. Newton se refería a éste como su *experimentum crucis*, o «experimento crucial». Su descomposición de la luz fue a un tiempo un hito en la historia de la ciencia y una sensacional demostración del método experimental. Uno de los muchos biógrafos de Newton escribió de este experimento que «fue tan bello en su simplicidad como eficaz como compendio de la teoría de Newton⁴⁷».

Isaac Newton nació en Lincolnshire (Inglaterra), en 1642, el año de la muerte de Galileo. Vino al mundo, quizá apropiadamente, el día de Navidad. De 1661 a 1665 estudió en el Trinity College de la Universidad de Cambridge. La suya fue, según otro de sus biógrafos, «la más notable carrera en la historia de la educación universitaria⁴⁸», pues Newton descubrió y llegó a dominar por completo y por sí mismo, en la reclusión de sus cuadernos de notas, la nueva filosofía, física y matemáticas que lenta y arduamente estaban forjando los científicos más avanzados de Europa. En 1665, cuando el británico ya se había graduado pero se había quedado para realizar otros estudios, la Gran Peste golpeó Inglaterra y la Universidad de Cambridge se vio obligada a cerrar sus puertas durante dos años, enviando a Newton de vuelta a Lincolnshire. Este tiempo de ocio forzado entre los campos y huertos de las tierras de su madre no representó un obstáculo para su educación, sino una inesperada bendición, puesto que le permitió, entonces en lo más alto de su capacidad científica, reflexionar sin interrupciones sobre

⁴⁷ Michael White, *Isaac Newton: The Last Sorcerer*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts: 1997, p. 165.

⁴⁸ Richard S. Westfall, «Newton», en *Encyclopaedia Britannica*, Fifteenth Edition, Vol. 24, p. 932.

numerosas cuestiones científicas sobre las cuales ya investigaba en la vanguardia. Los historiadores denominan a este período de la vida de Newton su *annus mirabilis*, o «año de los milagros», pues fue entonces cuando sentó los cimientos de muchas de sus ideas pioneras: en física, la idea de la gravitación universal (la inspiradora historia de la caída de la manzana, que nos ha llegado a través de la medio sobrina de Newton y de Voltaire, presuntamente habría tenido lugar en este período); en astronomía, las leyes de los movimientos de los planetas; en matemáticas, el cálculo. Fue también durante este tiempo cuando Newton comenzó a trabajar en una serie de experimentos revolucionarios sobre óptica.

La óptica, el estudio de la luz, estaba cobrando entonces una importancia científica cada vez mayor. Desde la Antigüedad, los pensadores habían ido desarrollando un conocimiento básico de cómo la luz se refleja y refracta (cambia de dirección al atravesar un medio transparente). Pero antes del siglo XVII, los espejos y las lentes eran de mala calidad. Además, su estudio se veía obstaculizado por el prejuicio de que las imágenes que producían no merecían un estudio detenido porque no eran naturales. ¿Qué importancia podían tener unas imágenes distorsionadas y engañosas? Sin embargo, la invención del telescopio y del microscopio aumentó la demanda de espejos y lentes de mejor calidad, lo que a su vez incrementó el interés en su fabricación y estudio. La nueva ciencia promovió la idea de que las distorsiones y transformaciones ópticas no eran innaturales (como para Aristóteles el movimiento «violento») sino (como el movimiento para Galileo) tan

sólo un nuevo ámbito gobernado por principios mecánicos y leyes matemáticas que podían descubrirse por medio de la experimentación. Pese a ello, Descartes y otros pioneros de la óptica del siglo XVII todavía se aferraban a la concepción, que se remontaba por lo menos hasta Aristóteles, de que la luz blanca era pura y homogénea, y que los colores eran una modificación o «tinción» de la luz blanca.

Recluido en la finca de su madre mientras la enfermedad hacía estragos en las ciudades, Newton transformó una de las habitaciones de la casa materna en un laboratorio de óptica, sellándola de la luz exterior salvo por un diminuto orificio. Allí pasaba los días absorto en sus experimentos. Uno de sus colaboradores escribió: «[P]ara agudizar sus facultades y centrar su atención se restringió a una pequeña cantidad de pan, durante todo el tiempo, con un poco de vino y agua, de los cuales, sin ningún tipo de regulación, tomaba según sintiera la necesidad o le fallara el espíritu». La principal herramienta de Newton era un prisma, que en aquella época era una curiosidad popular muy admirada por su capacidad para transformar la luz blanca en varios colores. Pero Newton transformó el juguete en un poderoso instrumento para la investigación científica de la luz.

Un estereotipo común que se ha infligido sobre generaciones de estudiantes es que el método científico es una empresa robótica que se limita a formular, contrastar y reformular hipótesis. Una descripción a primera vista más vaga pero, sin embargo, más precisa de lo que hacen los científicos es «mirar» un fenómeno,

examinarlo desde distintos ángulos y tocarlo y modificarlo de esta o aquella manera para ver qué ocurre y llegar a entenderlo. En su laboratorio convertido, Newton «miró» la luz, utilizando diversas combinaciones de prismas y lentes, hasta que llegó a la conclusión de que la luz blanca no era pura sino una mezcla de luz de varios colores. Escribiría más tarde que «el mejor y más seguro método para filosofar parece consistir primero en examinar diligentemente las propiedades de las cosas y establecer esas propiedades por medio de experimentos, para luego proceder más lentamente a producir hipótesis que les den explicación⁴⁹».

Durante años, sin embargo, Newton compartió estas investigaciones con muy pocas personas. Cuando volvió al Trinity College tras reabrir éste sus puertas en 1667, asistió a las clases de óptica que impartía Isaac Barrow, el primer titular de la cátedra lucasiana de matemáticas de Cambridge (una cátedra famosa entre cuyos ocupantes posteriores se cuentan Paul Dirac y Stephen Hawking), corrigió las notas de clase de Barrow, y en 1670 sucedió a éste como profesor lucasiano. Este puesto le obligaba a vestir una toga escarlata que indicaba su elevada posición sobre otros miembros del profesorado. También le obligaba a impartir una conferencia a los estudiantes al menos una vez a la semana, en latín, sobre algún tema relacionado con las matemáticas. Newton eligió la óptica, lo que le permitía combinar la matemática con la ciencia experimental y «someter los principios de esta ciencia a un examen más estricto». Pocos asistían a sus conferencias. Uno de sus colegas observó que

⁴⁹ Citado en White, *op. cit.*, p. 179.

«eran tan pocos los que iban a oírle, y menos los que le entendían, que a menudo, por falta de audiencia, era como si “hablara con las paredes⁵⁰». Literalmente hablaba con las paredes: nadie asistió a su segunda conferencia.

En 1671, Newton presentó a los miembros de la Real Sociedad un telescopio que había inventado sobre la base de sus estudios de óptica. La Real Sociedad se había fundado tan sólo diez años antes con el nombre de Real Sociedad de Londres para Mejorar el Conocimiento Natural; su lema, inscrito en su escudo de armas, era la expresión latina «*Nullius in verba*», que suele traducirse como «En palabras de nadie». La Real Sociedad se reunía semanalmente para analizar y debatir los artículos presentados por sus miembros. Este formato resultó ser crucial para estimular la investigación y profesionalizar la ciencia, puesto que racionalizó el proceso de publicación y defensa de la información científica; un investigador podía concentrarse en estudiar un tema concreto y luego presentar sus resultados en una carta. Estas cartas se publicaban en lo que al principio se conocía como *Correspondence*, y que luego se convirtió en las *Philosophical Transactions*, un precursor de la moderna revista científica. Cuando Newton entró en la Sociedad, pocos miembros habían oído hablar de él. Aun así, su telescopio causó sensación. De sólo 15 centímetros de longitud, estaba diseñado con tan gran ingenio y construido con tan sumo cuidado que podía equipararse a muchos otros telescopios de tamaño mucho mayor.

⁵⁰ *Ibid.*, p. 164.

Muchos de los miembros comenzaron a intentar construir uno para ellos y pronto invitaron a Newton a su círculo.

La primera carta formalmente enviada por Newton a la Sociedad fue aquella en la que daba cumplimiento a la audaz promesa que le había hecho a Oldenburg al comunicarle el «más singular» descubrimiento filosófico jamás realizado sobre el funcionamiento de la naturaleza. Este artículo se cita a menudo como una obra maestra de la literatura científica y un modelo de escritura en la ciencia. Proporciona una excelente descripción no sólo del propio experimento crucial sino también del proceso de pensamiento que condujo hasta él. Un lector perspicaz puede apreciar, entre líneas, el enorme júbilo que aportaban a Newton sus investigaciones. El artículo comienza del siguiente modo⁵¹:

Para dar cumplimiento a mi anterior promesa a usted, sin más ceremonia le haré saber que en el año de 1666... me procuré un prisma de vidrio triangular para intentar con él [contrastar] los celebrados Fenómenos de los colores. Y habiendo con este fin oscurecido mi cámara y practicado un pequeño orificio en las contraventanas para permitir el paso de una cantidad conveniente de rayos de Sol, coloqué el prisma en su entrada para que de ese modo fueran refractados contra la pared opuesta. Fue al principio un agradable divertimento ver los vivos e intensos colores de este modo producidos.

⁵¹ Newton, *Correspondence*, vol. I, p. 92.

Otros podrían haber caído en la tentación de prestar atención sólo al cautivador arco iris de colores. Newton no. Miraba lo que pasaba desde tantos ángulos como le era posible. Miraba más allá de los colores a la forma que adoptaban. «Me sorprendió verlos adoptar una forma *oblonga* cuando, de acuerdo con las leyes de la difracción, esperaba que fuera circular».

¿Por qué le habría de sorprender eso? En la concepción reinante de Descartes y otros, los prismas modificaban o teñían de algún modo la luz blanca para producir el espectro. Por tanto, un rayo de luz del grosor de un lápiz debería emerger del prisma con el mismo contorno circular que tenía al entrar.

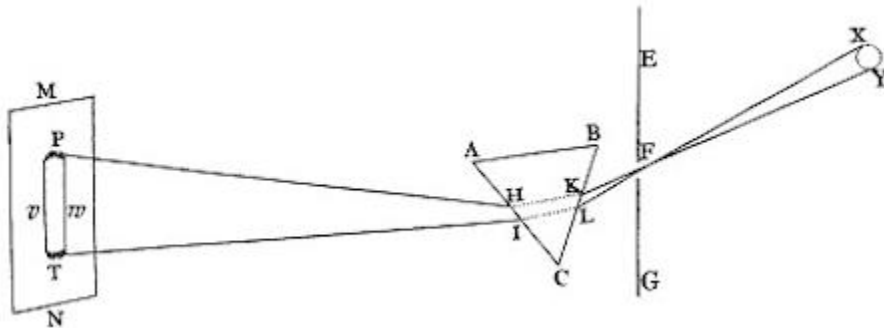


Figura 4.1. Diagrama de Newton de la forma oblonga producida por un haz de rayos de Sol tras atravesar un prisma.

En cambio, según vio Newton, la imagen adoptaba más bien el contorno de un circuito de carreras, con curvas semicirculares arriba y abajo conectadas por secciones rectas (figura 4.1); los colores aparecían dispuestos en bandas horizontales con el color azul en uno de los extremos y el rojo en el otro. Newton observó también una segunda característica intrigante: mientras que las

secciones rectas de la imagen eran nítidas, las curvas de ambos extremos (azul o rojo) eran borrosas. Esto, junto con la «extravagante» discrepancia entre la longitud y la anchura (la primera era unas cinco veces mayor que la segunda) «suscitaron en mí una curiosidad mayor de lo normal por examinar de dónde podía proceder».

Newton describe a continuación sus intentos por determinar por qué había adquirido la imagen un contorno tan inesperado simplemente por haber atravesado el prisma. En un intento por ver si podía alterar la forma de ese contorno, probó con prismas de distinto grosor e hizo pasar la luz por distintas partes del prisma. Giró el prisma adelante y atrás sobre su eje. Cambió el tamaño del orificio de la ventana y probó a colocar el prisma por fuera de ésta de manera que la luz del Sol lo atravesara antes de pasar por el orificio. Comprobó que no hubiera imperfecciones en el vidrio del prisma que pudieran explicar lo que observaba. Nada de esto afectaba la forma del contorno. Siempre aparecía la intrigante forma oblonga y cada uno de los colores era refractado (cambiaba su dirección en un determinado ángulo al atravesar el prisma) del mismo modo.

Newton recordaba haber visto que «una pelota de tenis, golpeada con una raqueta oblicua», seguía un arco por el aire. Comenzó a sospechar que quizá la forma de la mancha pudiera explicarse si el prisma por alguna razón hiciera que los rayos de luz viajaran siguiendo una línea curva en la dirección vertical. Esto lo llevó a toda otra serie de experimentos.

La eliminación gradual de estas sospechas me condujo al fin al *experimentum crucis*, que era el siguiente: tomé dos tablas y coloqué una de ellas a poca distancia por detrás del prisma situado junto a la ventana, de manera que la luz tuviera que atravesar un pequeño orificio, practicado en ella con ese propósito, antes de ir a parar a la otra tabla, que situé a unos doce pies [unos 3,7 metros], y en la que también practiqué un pequeño orificio para que por él pasara algo de la luz incidente. Entonces coloqué otro prisma detrás de esta segunda tabla de manera que la luz que había atravesado las dos tablas lo atravesara también y fuera refractada antes de llegar a la pared. Tras hacer esto, tomé el primer prisma en mi mano y lo hice girar lentamente adelante y atrás sobre su eje, con el fin de hacer que las distintas partes de la imagen proyectada sobre la segunda tabla atravesaran de manera sucesiva el orificio practicado en ella, y poder observar así en qué lugar de la pared las refractaba el segundo prisma. Y vi por la variación de esos lugares que la luz que tendía a aquel extremo de la imagen hacia el que se dirigía la refracción del primero de los prismas, sufría en el segundo prisma una refracción considerablemente mayor que la luz que tendía al otro extremo.

El diagrama del propio Newton sobre su *experimentum crucis*, que dibujó en una hoja de papel para sus primeras conferencias sobre óptica, se muestra en la figura 4.2.

Un rayo de luz del grosor de un lápiz que entraba a través de un agujero en la ventana pasaba por un primer prisma y se abría en abanico hacia una tabla situada a unos cuatro metros.

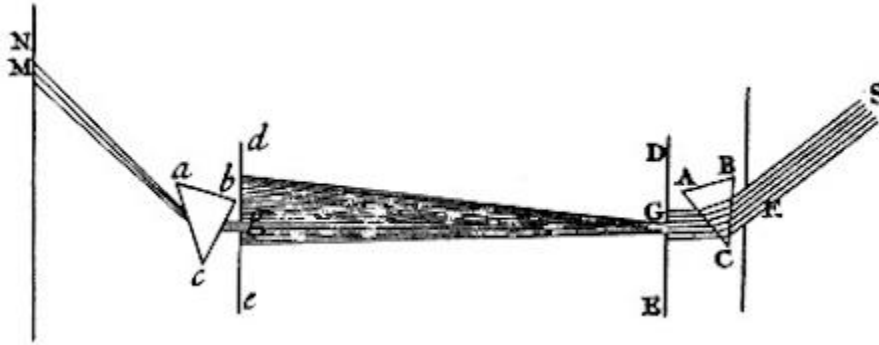


Figura 4.2. Diagrama de Newton de su experimentum crucis, de sus conferencias sobre óptica.

Al abrirse en abanico, producía un arco iris de colores oblongo en la dimensión vertical pero con bandas horizontales de color que iban del rojo al azul. Cualquiera que hubiera jugado con un prisma habría visto esto, aunque no necesariamente hubiera comprendido la significación de la forma. Lo que Newton hizo después era nuevo: añadió un segundo prisma y tabla. Practicó un orificio en la tabla, hizo que una parte de la banda oblonga de luz pasara por él hasta otro prisma situado al otro lado, y luego dirigió ese rayo hacia otra superficie. Al girar sobre su eje el primero de los prismas, hacía que la banda oblonga de luz de distintos colores se moviera arriba y abajo y atravesara el agujero de la segunda tabla y el segundo prisma. Entonces examinó con detenimiento lo que ocurría en la pared.

Newton observó que la luz azul, que el primer prisma había refractado con un ángulo pronunciado, era también refractada con un gran ángulo por el segundo prisma; de igual modo, la luz roja, que era refractada menos por el primer prisma, quedaba menos refractada por el segundo. Observó también que el ángulo con el

que estos rayos eran refractados no dependía del ángulo de incidencia (el ángulo con el que entraban en la superficie del primer prisma). Concluyó que el grado en que eran refractados los rayos (su «refrangibilidad», del latín *refrangere*, «romper») era una propiedad de los propios rayos y no de los prismas. Los rayos mantenían su refrangibilidad al pasar por dos prismas. Por tanto, los prismas no modificaban los rayos de luz sino que únicamente los tamizaban de acuerdo con su refrangibilidad.

Newton conocía ahora la respuesta a su pregunta inicial. La imagen del arco iris tenía forma de circuito de carreras porque el prisma dispersa el rayo de luz de una manera que viene dictada por el comportamiento de los colores individuales que la componen. Si el eje del prisma es horizontal, el prisma mantiene el rayo con la misma anchura pero lo dispersa verticalmente. Las puntas verticales de la forma oblonga son borrosas porque hay menos rayos en los extremos. Newton escribió: «Y por tanto la causa verdadera de la longitud de esa imagen [la forma oblonga] se determinó que no era otra que el hecho de que la luz consiste en rayos que se refractan de forma distinta, los cuales, sin relación con la diferencia en su incidencia, son transmitidos, de acuerdo con su grado de refrangibilidad, hacia diversas partes de la pared».

¿Qué era lo que hacía crucial a este experimento de entre los cientos que Newton realizó y que le mostraron efectos parecidos? Su propia confianza en las conclusiones que extrae de este experimento se basan también en todos sus otros intentos por mirar la luz con prismas y lentes. Pero Newton no veía razón alguna para insistir en

que sus colegas siguieran su propia y extensa indagación. Uno sólo debería bastar para poner a sus colegas en la dirección correcta. Así que el *experimentum crucis* estaba envuelto en una cierta teatralidad; era una demostración o recapitulación de lo que por entonces ya sabía cómo hacer. El propósito de esa demostración o exhibición era convencer a sus colegas, así que debía ser sencillo, practicable con instrumentos fáciles de conseguir y con resultados nítidos y vistosos que maximizaran su impacto. Tal como escribiría más tarde a alguien que intentaba recrear sus experimentos, «en lugar de una multitud de cosas intentad tan sólo el *experimentum crucis*. Pues no es al número de experimentos sino a su peso a lo que hay que atender; y donde baste con uno, ¿quién necesita muchos⁵²?».

Este experimento proporcionaba a Newton no sólo la respuesta a su pregunta inicial de por qué la forma de los colores era oblonga, sino que le abría otras posibilidades y planteaba nuevas preguntas. Había estado ocupado puliendo lentes para telescopios, pero vio que este descubrimiento del prisma implicaba una importante limitación sobre la calidad de los telescopios construidos con lentes. «Cuando comprendí esto», escribió, «abandoné el mencionado trabajo sobre las lentes; pues vi que la perfección de los telescopios quedaba comprometida» no por imperfecciones en la lente, sino por el hecho de que «la luz es en sí misma una mezcla heterogénea de rayos de distinta refrangibilidad». Las lentes enfocan desviando o refractando la luz, pero como los distintos tipos de luz se refractan en un grado

⁵² Newton, *Correspondence*, vol. II, p. 79.

distinto, ni siquiera una lente perfecta podría recoger todos los rayos en un solo punto. Newton se dio cuenta de que una manera más eficaz de enfocar la luz en un telescopio sería utilizar espejos en lugar de lentes, puesto que cuando un espejo devuelve o refleja la luz para enfocarla, el ángulo con el que hacen esto los distintos tipos de luz es siempre el mismo. Newton explica que enseguida se había puesto a construir un telescopio que utilizaba espejos, pero que su trabajo había quedado interrumpido por la peste. En 1671 construyó por fin uno con el que se sentía satisfecho y orgulloso, lo bastante al menos para superar su habitual reserva obsesiva y hacerlo público en la Real Sociedad.

Newton expone todo esto en la primera mitad del artículo y dedica la segunda a debatir las diversas implicaciones de su descubrimiento. Una primera era que la refrangibilidad de la luz no era una propiedad causada por el prisma por medio de algún tipo de modificación, como Descartes y la mayoría de los otros autores sobre el tema creían: «Los colores no son *cualidades de la luz*, derivados de refracciones o de reflexiones de cuerpos naturales (como por lo general se cree) sino *propiedades originales y connaturales*, que en rayos distintos son distintas...». Una segunda implicación era que «Al mismo grado de refrangibilidad corresponde siempre el mismo color, y al mismo color pertenece siempre el mismo grado de refrangibilidad». Una tercera era que la refrangibilidad o color de un rayo no se ve afectada por la sustancia que atraviesa. Newton había examinado este extremo con suma atención:

La especie de color y el grado de refrangibilidad propios de cada tipo particular de rayo no son mutables por refracción ni por reflexión por cuerpos naturales ni por ninguna otra causa que yo haya podido observar. Siempre que un tipo cualquiera de rayos ha sido separado correctamente de los otros tipos, ha mantenido de manera obstinada su color pese a mi mayor empeño en cambiarlo. Lo he refractado con prismas y reflejado con cuerpos que a la luz del día eran de otros colores; lo he interceptado con la película coloreada de aire comprimida entre dos placas de vidrio comprimidas; transmitido a través de medios coloreados y a través de medios irradiados con otros tipos de rayo y terminado de distintas maneras; y, sin embargo, no he podido nunca producir a partir de él un nuevo color.

Newton llega a la extraordinaria conclusión de que la luz blanca no es original sino compuesta, un hecho que había confirmado en algunos de sus experimentos utilizando prismas y lentes adicionales para volver a combinar la luz que antes había separado:

Pero la más sorprendente y maravillosa de todas las composiciones era la de la blancura. No hay ningún tipo de rayos que por sí solos puedan exhibirla. Es siempre compuesta y en su composición son requeridos todos los colores primarios antes mencionados, mezclados en la debida proporción. A menudo me he admirado de que todos los colores del prisma, forzados a converger, y por tanto a mezclarse de nuevo como lo estaban en la luz antes de incidir en el prisma, reproducen una luz entera y perfectamente blanca... De donde, en consecuencia, se sigue que la blancura es el color habitual de la luz

porque la luz es un agregado confuso de rayos dotados de todos los tipos de colores, que son lanzados de manera promiscua desde las distintas partes de los cuerpos luminosos.

El «sorprendente y maravilloso» descubrimiento de Newton arrojaba nueva luz sobre lo que hasta entonces habían sido profundos misterios. En el resto del artículo acomete algunos de éstos, uno a uno, resolviendo con facilidad rompecabezas que habían desconcertado a sus colegas. ¿Cómo funcionan los prismas y cómo hacen la forma oblonga de la mancha que producen? No transforman la luz, sino que la tamizan, separándola en bandas de refrangibilidad parecida. Imaginemos (esta imagen no pertenece a Newton) un grupo de corredores cada uno de los cuales es capaz de dar una curva con un ángulo distinto. Aunque se mantienen juntos cuando se mueven en línea recta, en la primera curva cerrada se dispersarán en un abanico. ¿Cómo se forma el arco iris? Newton explica esto aduciendo que las gotas de la lluvia actúan como una nube de diminutos prismas que refractan la luz del Sol que les llega. ¿Y qué decir de esos «extraños fenómenos» de los cristales coloreados y otros materiales que según cómo producen colores distintos? «Ya no son un enigma», dice Newton, puesto que se trata de materiales que en distintas condiciones reflejan y transmiten distintos tipos de luz.

Newton daba cuenta también de un «inesperado experimento» realizado por Robert Hooke, el Curador de Experimentos de la Real Sociedad. Hooke había hecho pasar la luz a través de un frasco con

un líquido rojo y otro con un líquido azul. Ambos dejaban pasar la luz. Sin embargo, cuando intentaba hacer pasar la luz por los dos frascos juntos, éstos la bloqueaban. Hooke no había logrado explicar esto. ¿Por qué, si cada frasco por separado permitía el paso de la luz, juntos la bloqueaban? El desconcierto de Hooke, dice Newton, se debía obviamente a la suposición de que la luz era una sustancia uniforme, cuando en realidad está compuesta por muchos tipos de rayos. El frasco azul dejaba pasar un tipo pero bloqueaba todos los otros; el rojo dejaba pasar un segundo tipo y bloqueaba el resto. Como los dos frascos no dejaban pasar el mismo tipo de luz, «ningún rayo podía atravesar los dos».

Newton podía también explicar el color de los cuerpos naturales: reflejan «un tipo de luz en mayor cantidad que otro». Describe a este respecto sus propios experimentos en una habitación oscura en la que proyectaba luz de diferentes colores sobre varios objetos para hallar que «de este modo se puede hacer que cualquier objeto parezca ser de cualquier color». ¿Hay colores en la oscuridad? ¿Es el color una propiedad de los objetos? No; el color es una propiedad de la luz que incide sobre ellos.

Newton acaba su artículo con algunas sugerencias de experimentos que podían realizar sus colegas, aunque advirtiendo que estos experimentos, como el *experimentum crucis*, son muy sensibles. El prisma tiene que ser de gran calidad, pues de lo contrario la luz que alcance el segundo prisma será impura, y la habitación tiene que estar en la oscuridad más absoluta para evitar que la luz se mezcle con los colores y confunda los resultados. Esta última característica

hace que el *experimentum crucis* sea más difícil de reproducir de lo que las clases de ciencia de educación secundaria hacen creer, por mucho que parezca tentadoramente accesible y vivamente instructivo. Newton concluye:

Esto, según creo, es suficiente como introducción a los experimentos de este tipo; y si algún miembro de la Real Sociedad siente la curiosidad de procurarlos, me agradecerá saber con qué éxito, pues si algo parece ser defectuoso o contradice esta relación, dispondré de la oportunidad de dar mejores instrucciones sobre ellos, o de reconocer mis errores, si he cometido alguno.

La carta de Newton llegó a manos de Oldenburg el 8 de febrero. La fortuna quiso que éste estuviera organizando una sesión de la Real Sociedad para ese mismo día y pudiera añadirla al orden del día. Quienes estuvieron presentes asistieron primero a la presentación de una carta sobre la posible influencia de la Luna en las lecturas barométricas, luego otra sobre los efectos de la picadura de una tarántula y por fin escucharon la contribución de Newton. La Sociedad quedó enormemente impresionada. Según informó Oldenburg, «[L]a lectura de su discurso sobre la luz y los colores fue casi su único entretenimiento en aquella ocasión. Puedo asegurarle, señor, que encontró una atención singular y un aplauso fuera de lo común⁵³». Oldenburg mencionó también que los miembros le habían expresado su deseo de que se publicara lo antes posible en las

⁵³ Newton, *Correspondence*, vol. I, p. 107.

Philosophical Transactions; apareció en el siguiente número ese mismo mes.

No sólo fue el *experimentum crucis* de Newton un experimento bello y la carta que lo describe en las *Philosophical Transactions* un modelo de artículo científico, sino que encendió la que posiblemente sea la primera «controversia en una revista», el debate acalorado entre científicos acerca de una cuestión. El experimento de Newton, que desafiaba la ortodoxia de la época según la cual los prismas creaban colores por modificación de la luz blanca, provocó revuelo en la Real Sociedad y entre otros científicos, sobre todo en Francia.

Sin intentar siquiera reproducir el *experimentum crucis*, Robert Hooke rechazó el artículo de Newton apenas una semana después de leerlo y con críticas precipitadas e incorrectas sobre las hipótesis que parecía plantear. Newton estuvo a la altura de las circunstancias, mostrando con brillantez su talento combativo en el intercambio de cartas que se produjo, recapitulando y elaborando sus argumentaciones. No faltó tampoco uno de los desaires más sarcásticos de la historia que sacaba punta del hecho de que Hooke era tan bajo y encorvado (una condición en parte agravada por su riguroso trabajo de conservador, siempre sentado) que parecía un enano. En una carta que rebosaba falsas alabanzas, Newton halagaba las contribuciones de Hooke a su propio trabajo con las palabras, «Si yo he visto más lejos es gracias a que me he alzado a hombros de gigantes⁵⁴». Este célebre comentario se cita a menudo

⁵⁴ *Ibid.*, p. 416.

como un gesto de cortesía y humildad cuando en realidad era una reprochable ridiculización de Hooke.

Los científicos franceses tardaron más en convertirse. Uno de ellos era entonces un venerable profesor del Colegio de los Jesuitas Ingleses de Lieja llamado Francis Hall, aunque firmaba Linus en la correspondencia. En el otoño de 1674, Linus (casi octogenario) escribió a Oldenburg para explicarle que, en experimentos con prismas que él mismo había realizado treinta años antes, nunca había observado un contorno alargado en días soleados, y sostenía que la imagen que Newton había visto era un efecto de las nubes. Éste, que consideraba a Linus incompetente, ni siquiera se dignó contestar. Oldenburg, sin embargo, pidió a Hooke que preparara una demostración del *experimentum crucis* de Newton para la sesión de la Real Sociedad de marzo de 1675. El tiempo, por desgracia, no acompañó, y a la vista de los comentarios de Linus, se consideró inútil realizar el experimento en un día nublado. Linus murió en el otoño de ese mismo año, pero un discípulo devoto hizo suya la causa, confiando en que su maestro resultaría vindicado la próxima vez que la Real Sociedad intentara el experimento en un día soleado. Hooke organizó una vez más una demostración en la Real Sociedad, y por fin se dispuso que lo que Newton llamaba «el controvertido experimento» se realizara el 27 de abril de 1676 (en lo que resultó ser un día soleado). Aunque Newton no estaba presente (por lo general rehuía los eventos públicos), el día se convirtió en un hito en los albores de la ciencia moderna, pues fue la primera vez que un experimento era planeado y ejecutado por una sociedad científica

con el fin de dar una respuesta definitiva a una controversia apremiante. En los archivos oficiales de la Real Sociedad se lee:

*El experimento de Mr. NEWTON, que había sido discutido por Mr. Linus y sus colegas de Lieja, fue ejecutado ante la Real Sociedad siguiendo las instrucciones de Mr. NEWTON, y habiéndose completado con éxito, como él siempre había asegurado que ocurriría, se ordenó que Mr. OLDENBURG comunique este éxito a quienes en Lieja habían anteriormente certificado que si el experimento era realizado ante la Sociedad y se completaba con éxito de conformidad con las aseveraciones de Mr. NEWTON, ellos convendrían en el resultado*⁵⁵.

Algunos críticos franceses todavía mantuvieron su postura durante algunos años más. Un jesuita llamado Anthony Lucas intentó realizar el *experimentum crucis* pero encontró rayos rojos entre los violeta; otro encontró rojo y amarillo entre el violeta. Newton dejó de responder, escribiendo que «[e]sto no debe decidirse con discurso, sino mediante nuevas realizaciones del experimento⁵⁶». Ya había advertido de lo que podía ir mal en el experimento. Como todo dispositivo de ejecución compleja, un experimento puede prepararse de manera incorrecta. Sin embargo, cuando se realiza correctamente pone de manifiesto lo que fue mal en los intentos fallidos; proporciona sus propios criterios de éxito.

El *experimentum crucis* de Newton proporcionó muchas cosas al mundo: información nueva, un conjunto de instrumentos y

⁵⁵ Thomas Birch, *The History of the Royal Society of London*, vol. 3, Johnson Reprint Corp., Nueva York, 1968, p. 313.

⁵⁶ Newton, *Correspondence*, vol. I, p. 356.

técnicas, e incluso una lección moral. A todas ellas debe su belleza. El experimento de Newton sacó a la luz una verdad sobre el mundo con simplicidad e ingenio asombrosos: ¿quién, tras utilizar un prisma para convertir un rayo de luz en un arco iris, hubiera pensado en aislar una parte de éste y hacerlo pasar por otro prisma? Con esta configuración, no fueron necesarias más manipulaciones para demostrar ante los colegas de Newton que la luz blanca está compuesta de distintos colores con distintos grados de refracción.

El experimento nos permitió entender muchos fenómenos desconcertantes de la luz y nos proporcionó técnicas para separar la luz de diferentes colores y para construir mejores telescopios. El descubrimiento de Newton estalló como un petardo, estableciendo conexiones en direcciones múltiples.

Por último, el *experimentum crucis* de Newton fue una lección moral para los científicos. Les dijo: «Ésta es la manera de proceder para entender un fenómeno. Hay que experimentar con tesón y constancia, escoger la demostración más llamativa y simple que se encuentre, indicar de qué modo puede salir mal y señalar qué nuevas conexiones hace posibles».

Su belleza, por tanto, no tiene nada que ver con el atractivo de los colores. Como Eratóstenes con las sombras, Newton fue capaz de ver más allá de los colores hasta comprender por qué se comportaban de la manera que lo hacían. Como el experimento del plano inclinado de Galileo, el *experimentum crucis* de Newton reveló también algo sobre la propia naturaleza de la experimentación. Lo

que distingue al *experimentum crucis* es que está revestido de una especie de belleza moral.

Cuando en 1721 la segunda edición francesa de la *Óptica* de Newton se preparaba para la prensa en París (la primera había aparecido en 1704), el editor francés, Varignon, escribió a Newton, «He leído la *Óptica* con gran placer, más aún por cuanto vuestro nuevo sistema de los colores está firmemente establecido mediante los más bellos experimentos». Varignon le pidió a Newton un diagrama para el frontispicio que simbolizara el contenido de la obra.

Newton escogió un dibujo del *experimentum crucis* con un lacónico pie de figura: «La luz no cambia de color cuando es refractada». Era un símbolo elegante de lo que, en manos de Newton, se había convertido en la ciencia de la óptica.

Interludio

¿Destruye la ciencia la belleza?

Cuando escuché al docto astrónomo, cuando me presentaron en columnas las pruebas y guarismos, cuando me mostraron las tablas y diagramas para medir, sumar y dividir, cuando escuché al astrónomo discurrir con gran aplauso de la sala, qué pronto me sentí inexplicablemente hastiado, hasta que me escabullí de mi asiento y me fui a caminar solo, en el húmedo y místico aire nocturno, mirando de rato en rato, en silencio perfecto a las estrellas.

WALT WHITMAN

Para los amantes de la belleza, Newton no trajo paz sino una espada.

Los antiguos filósofos, los poetas y los artistas otorgaban a la luz una posición especial entre los fenómenos del mundo natural. Platón comparaba el Sol y sus rayos con el Bien —la idea más elevada— que todo lo nutre e ilumina. Quienes le siguieron en la tradición platónica, como san Agustín, Dante, Grosseteste y san Buenaventura, veían un vínculo especial entre luz y belleza; la luz era el principio de toda belleza sensual y visible, y bella ella misma. Iluminaba el mundo que Dios había creado, era su epifanía. La luz, como es natural, ocupaba también una posición especial para los pintores, que en tiempos de Newton la consideraban un «acto de amor», en palabras de Kenneth Clark, porque la luz parecía expandir, avivar e intensificar el mundo⁵⁷.

Pero la ciencia moderna, y en especial la obra de Newton, cuestionaba esta concepción. De un solo golpe, la luz había perdido su posición privilegiada como principio de epifanía. El mundo había dejado de iluminarse a sí mismo, a través de la luz, en beneficio de los humanos; ahora era la mente humana la que proyectaba su luz para iluminar al mundo. La luz se había convertido en un fenómeno más gobernado por leyes mecánicas y matemáticas susceptibles de ser conocidas⁵⁸. Lo que escribieron los poetas sobre lo que había

⁵⁷ Kenneth Clark, *Landscape into Art*, Harper & Row, Nueva York, 1976, p. 65.

⁵⁸ Las formas en las que los poetas afrontaron este desafío la ha estudiado, entre otros, Marjorie Nicolson en *Newton Demands the Muse: Newton's Opticks and the Eighteenth Century Poets*, Archon, Hamden, Connecticut, 1963; y en M. H. Abrams, *The Mirror and the Lamp: Romantic Theory and the Critical Tradition*, Oxford University Press, Nueva York, 1971. (Hay

hecho Newton con ese tesoro de los colores, el arco iris, nos da la medida de su respuesta a esta nueva ciencia.

Para algunos poetas y artistas de los siglos XVIII y XIX, Newton era el enemigo que había transformado el arco iris y otras manifestaciones del color en un ejercicio de matemáticas. Keats fue uno de esos poetas. En 1817 se lamentaba de que «han despojado al arco iris de su misterio»; y en una fiesta, él y el escritor Charles Lamb reprendieron a su anfitrión, el pintor británico B. R. Haydon, por haber incluido un busto de Newton en uno de sus cuadros, recordándole que el británico «había destruido toda la poesía del arco iris al reducirlo a los colores del prisma⁵⁹». Un año y medio más tarde, todavía agitado, Keats abordó este tema una vez más en su poema «Lamia» (1820), refiriéndose a la ciencia, según era costumbre en aquellos años, como «filosofía natural»:

*...¿No se desvanecen los encantos
sólo con que los toque la gélida filosofía?
Antes había en el cielo un sobrecogedor arco iris;
hoy conocemos su urdimbre, su textura; forma parte
del aburrido catálogo de las cosas vulgares.
La filosofía recorta las alas del ángel,
conquista los misterios con reglas y líneas,
despoja de embrujo el aire, de gnomos las minas;
desteje el arco iris...*

trad. cast.: *El Romanticismo: tradición y revolución*, A. Machado Libros, Boadilla del Monte, 1992).

⁵⁹ Se ha escrito un libro entero sobre esta fiesta: Penelope Hughes-Hallett, *The Immortal Dinner: A Famous Evening of Genius and Laughter in Literary London*, New Amsterdam, Chicago, 2002.

Ese mismo año vio la publicación del poema «Al arco iris», de Thomas Campbell:

*¿Puede toda esa óptica revelar
ante mí tu forma, y placirme
como me place soñar con gemas y oro
ocultos en el radiante arco iris?*

*Cuando la ciencia de la faz de la creación
retira el velo de la maravilla,
¡qué preciosas visiones ceden su lugar
ante las frías leyes materiales!*

El poeta William Blake representa en uno de sus dibujos a Newton como un hombre desnudo y con barba que con un compás mide cosas con suma precisión, y escribe al respecto:

*Los átomos de Demócrito
y las partículas de luz de Newton
son arena en la orilla del mar Rojo:
donde las tiendas de Israel brillan con tanto fulgor.*

En sus obras *Teoría de los colores* y *Contribuciones a la óptica*, Johann Wolfgang von Goethe llegó al extremo de desarrollar una ciencia del color explícitamente antinewtoniana basada únicamente en cómo se percibe. El propio Goethe realizó una interesante serie de experimentos y logró describir y explicar aspectos de la

percepción del color que Newton no había notado. El trabajo de Goethe tuvo una enorme influencia en muchos artistas, entre ellos el pintor J. M. W. Turner.

Hubo otros artistas, sin embargo, que vieron los logros de Newton con otros ojos. Éste no fue, por lo que sabemos, un buen conocedor del arte; en una ocasión calificó a las esculturas, no sin desdén, de «muñecas de piedra», y le gustaba citar la opinión de Isaac Barrow sobre la poesía como «una especie de ingenioso sinsentido». Pese a ello, muchos artistas consideraron que había abierto las puertas a nuevos dominios de la belleza. Uno de estos artistas fue el poeta británico James Thomson, quien, como Marjorie Nicolson ha señalado, junto con otros de sus contemporáneos aprendió a ver el arco iris y los crepúsculos con «ojos newtonianos⁶⁰»:

*También ahora el sol poniente y las cambiantes nubes,
vistas, Greenwich, desde tus amadas alturas, declaran
la justicia y belleza de las leyes de la refracción.*

Tal como escribió M. H. Abrams, Thomson parecía creer que «sólo Newton ha visto la belleza desnuda».

Esta brecha entre los poetas románticos de los siglos XVIII y XIX sigue con nosotros entre aquellos para quienes la investigación destruye la belleza y aquellos para quienes la hace más profunda. Al físico Richard Feynman lo interpeló en este sentido un amigo poeta que afirmaba que mientras que los artistas ven la belleza en una flor, los científicos la diseccionan hasta convertirla en un objeto sin

⁶⁰ Nicolson, p. 25.

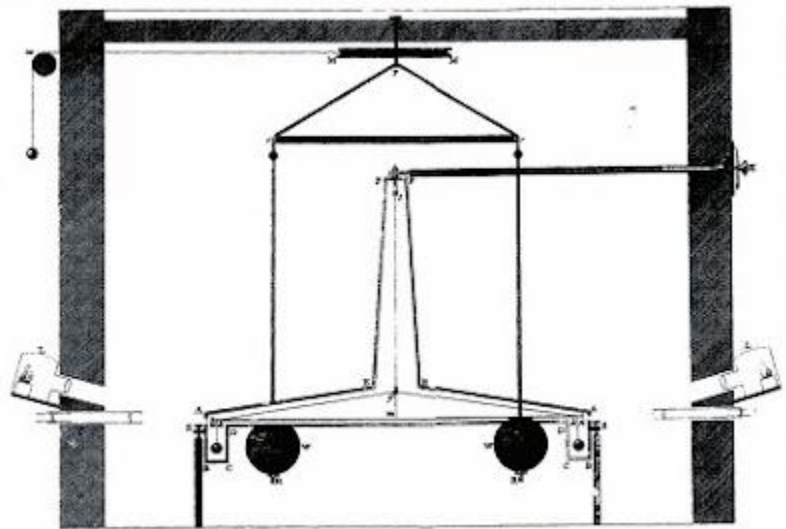
vida. Feynman, por supuesto, sabía cómo replicarle. Le contestó que como científico era capaz de ver en la flor más belleza y no menos. Podía apreciar, por ejemplo, las bellas y complejas acciones del interior de sus células, de su ecología, de su papel en los procesos evolutivos. «El conocimiento de la ciencia», prosiguió Feynman, «sólo agranda el interés, el misterio y el asombro que produce una flor⁶¹». Aprender sobre todas estas cosas disminuye nuestra apreciación de una flor tan poco como aprender sobre acústica disminuye nuestra apreciación de las *Cuatro estaciones*, de Vivaldi. Nuestro sentido del asombro ante el mundo no se mantiene retrayéndose de la ciencia sino implicándose en ella. El antídoto del docto astrónomo es el buen astrónomo, el que sigue compartiendo su asombro.

⁶¹ De «The Best Mind Since Einstein», NOVA, 21 de noviembre de 1993.

Capítulo 5

El peso del mundo

El austero experimento de Cavendish



Equipo de Henry Cavendish para medir la densidad de la Tierra.

El científico inglés Henry Cavendish fue uno de los más grandes químicos y físicos del siglo XVIII, y también uno de los más extravagantes. Por suerte para él y para la ciencia, su ascendencia aristocrática y la riqueza que heredó le proporcionaron los medios que necesitaba para entregarse a sus intereses sin ataduras. Consiguió así realizar un extraordinario experimento cuya precisión no se lograría mejorar de manera significativa durante un siglo.

Cavendish (1731-1810) tenía la voz nerviosa y chillona, vestía con ropas pintorescas que literalmente habían pasado de moda medio siglo antes y rehuía la compañía de otras personas tanto como le era posible. Su primer biógrafo, un científico de la Real Sociedad llamado George Wilson, señalaba que los colegas de Cavendish decían de él que vestía como sus abuelos, con sombrero de tres

picos incluido, y que era «tímido y vergonzoso hasta un extremo enfermizo⁶²». Cuando no podía evitar el tormento de ser presentado a otras personas, se quedaba en silencio mirando por encima de sus cabezas y en alguna ocasión había salido corriendo embargado por la angustia. Alguna vez se había quedado parado, como congelado en el umbral de una habitación llena de gente, literalmente incapaz de dar un paso para entrar. Cuando viajaba en carruaje se acurrucaba en un rincón para evitar ser visto por las ventanas. En su paseo diario siempre hacía la misma ruta a la misma hora y caminaba por el centro de la calle para eludir encuentros casuales. Cuando descubrió que sus vecinos habían averiguado su rutina y se congregaban para observar al excéntrico del barrio, cambió de horario y comenzó a dar sus paseos por la noche. El único retrato de Cavendish tuvo que realizarse de incógnito. Sabedores de que su timidez le impediría acceder a ser pintado, sus conocidos invitaron en secreto a un pintor a una cena de la Real Sociedad y lo sentaron cerca de un extremo de la mesa, desde donde podía observar bien las facciones del científico. *Cavendo tutus* («Sé cauto para estar seguro») era el lema de la familia Cavendish, pero el comportamiento de Henry llevó este consejo hasta un extremo patológico.

Cavendish, cuya madre murió cuando tenía dos años de edad, sentía un especial temor por las mujeres. Para evitar el trato con su ama de llaves, antes de retirarse a dormir le dejaba sobre una mesa las instrucciones por escrito para el trabajo y las comidas del día

⁶² George Wilson, *Life of the Hon. Henry Cavendish*, Cavendish Society, Londres, 1851, p. 166. Para una biografía moderna, véase Christa Jungnickel y Russell McCormmach, *Cavendish: The Experimental Life*, Bucknell University Press, Lewisburg, Pennsylvania, 1999.

siguiente. Después de que en una ocasión tropezara por casualidad con ésta en la escalera, hizo instalar una escalera de servicio para evitar que se produjeran nuevos encuentros. Uno de sus conocidos de la Real Sociedad recordaba que,

Durante una velada vimos una bella muchacha que, asomada a una ventana más alta del edificio opuesto, observaba la cena de los filósofos. Atrajo la atención de todos, que uno tras otro nos levantamos y nos reunimos alrededor de la ventana para admirar a la muchacha. Cavendish, pensando que mirábamos la Luna, se acercó a nosotros a su extraña manera y, cuando vio cuál era el verdadero objeto de nuestro estudio, dio la vuelta con un mohín de intensa repugnancia y gruñó, «¡bah!»⁶³.

Henry Cavendish era extremadamente metódico tanto en su vida como en su trabajo. Siempre almorzaba lo mismo: pierna de cordero. Sus rutinas diarias, según nos cuenta Wilson, se ejecutaban de conformidad con una ley «tan inflexible e imperativa como la que gobierna los movimientos de los astros»:

Llevaba la misma ropa año tras año, insensible a las mudanzas de la moda. Calculaba la venida de su sastre para confeccionar un nuevo juego de trajes del mismo modo que hubiera calculado la venida de un cometa... Colgaba su sombrero invariablemente del mismo gancho cuando asistía a las reuniones del Club de la Real Sociedad. Colocaba su bastón siempre en una de sus botas, y siempre en la misma... Así fue en vida, una maravillosa pieza de relojería

⁶³ *Ibid.*, p. 170.

intelectual; y del mismo modo que vivió bajo reglas estrictas, así murió, habiendo predicho su muerte como si se tratase del eclipse de alguna gran luminaria (como en efecto lo era) y calculado el momento justo en que las sombras del mundo oculto lo envolverían con su oscuridad⁶⁴.

Escritor perspicaz y meticuloso, Wilson demostró una fuerte ambivalencia ante su sujeto biográfico. Ante la obligación de evaluar a Cavendish como persona, logró tras un heroico esfuerzo producir una notable evocación de este extraño y brillante hombre:

Moralmente [su carácter] era un vacío que sólo puede describirse mediante una serie de negaciones. No amó; no odió; no demostró esperanza ni temor; no adoró como otros hacen. Se apartó del prójimo del mismo modo que, por lo que parece, se apartó de Dios. No había en su naturaleza nada franco, entusiasta, heroico ni caballeroso, pero en la misma medida faltaba lo mezquino, lo denigrante y lo innoble. Estaba casi desprovisto de pasiones. Todo aquello que para ser aprehendido necesitaba algo más que el intelecto puro o que requería el ejercicio de la fantasía, la imaginación, el afecto o la fe resultaba desagradable para Cavendish. Una cabeza intelectual que pensaba, un par de ojos maravillosamente agudos que observaban y un par de manos extremadamente hábiles que experimentaban y escribían es todo lo que advierto en su obra. Su cerebro parece haber sido poco más que un motor de cálculo; sus ojos, entradas para la visión más que fuentes de lágrimas; sus manos, instrumentos de manipulación

⁶⁴ *Ibid.*, p. 188.

que nunca temblaron de emoción o se unieron en adoración, gratitud o desespero; su corazón sólo un órgano de la anatomía, necesario para la circulación de la sangre. Y aunque un ser así, que dio la vuelta a la máxima nihil humani me alienum puto [«Nada humano me es ajeno»], no puede ser amado, tampoco puede ser aborrecido u odiado. Fue, a pesar de la atrofia o falta de desarrollo de muchas de las facultades que se hallan en aquellos en quienes «los elementos se encuentran en amable mezcla», un genio tan verdadero como los simples poetas, pintores y músicos de pequeño intelecto pero gran corazón e imaginación, ante quienes tan dispuesto a arrodillarse se siente el mundo⁶⁵.

Ese genio residía en su particular visión del mundo y en el lugar que en él ocupaba como científico. Wilson prosigue: «Su Teoría del Universo debía decirle que éste consiste únicamente en una multitud de objetos susceptibles de ser pesados, contados y medidos; y la vocación a la que se sentía llamado era pesar, contar y medir tantos de esos objetos como le permitieran los setenta años que le tocó vivir».

Cavendish utilizaba una pequeña sección de su residencia principal en Clapham, cerca de Londres, como dormitorio, y el resto de la casa estaba abarrotado de equipos científicos: termómetros, indicadores de todo tipo, instrumentos de medida y aparatos astronómicos, amén de herramientas para la construcción de nuevos equipos. Convirtió el piso superior en un observatorio

⁶⁵ *Ibid.*, p. 185.

astronómico y el árbol más grande de su jardín soportaba, casi literalmente, sus observaciones meteorológicas. Estaba obsesionado con la reconstrucción de instrumentos y realizó varias mejoras significativas en balanzas químicas, equipos eléctricos, termómetros de mercurio, herramientas geológicas e instrumentos astronómicos. Pero no le preocupaba en absoluto la apariencia externa, a menudo tosca, de sus creaciones, que los historiadores de la ciencia han descrito con frases como «de exterior burdo pero singular perfección». (Su ama de llaves descubrió con asombro en una ocasión que para construir un aparato de evaporación se había apropiado de los orinales).

Algunos historiadores de la ciencia han escrito sobre el efecto que el carácter de un científico tiene sobre el tipo de investigación que realiza. En el caso de Cavendish sin duda ocurría así, pero también a la inversa: la ciencia afectaba a su carácter. Las exigencias que imponían sobre su persona el tipo de mediciones de precisión en las que se embarcó contribuyó sin duda a mantener funcional a una persona tan neurótica. No sólo ayudaban esas mediciones a que concentrara su energía en una actividad constructiva, sino que el respeto que le ganaron entre los miembros de la Real Sociedad le permitió mantener los pocos vínculos sociales que tenía. Este respeto era merecido, pues los logros de Cavendish fueron importantes, numerosos y de gran alcance. De hecho, sus innovaciones fueron mayores de lo que en su tiempo se supo, pues Cavendish, que consideraba sus descubrimientos como su propiedad personal, no publicó muchos de ellos, en parte por su

tendencia a la reclusión y en parte porque los veía como investigaciones en progreso, necesitadas de una mayor precisión. En una carrera investigadora de cincuenta años de trabajo obsesivo, escribió menos de veinte artículos y ningún libro. Consecuencia de ello es que la Ley de Ohm (que describe la relación entre el voltaje eléctrico, la resistencia y el amperaje) y la Ley de Coulomb (que describe la fuerza entre dos cuerpos con carga eléctrica) no hayan recibido el nombre de la primera persona que las descubrió. Igual que obras maestras de la pintura que un artista perpetuamente insatisfecho dejara abandonadas en una buhardilla, estos descubrimientos permanecieron desconocidos durante décadas en los cuadernos de notas de Cavendish hasta que fueron descubiertos con asombro por editores e historiadores.

Wilson otra vez:

Lo bello, lo sublime y lo espiritual parecen haber estado del todo fuera de sus horizontes... Muchos de nuestros filósofos naturales han tenido un sentido estético fuerte y cultivado y se han deleitado enormemente con alguna de las bellas artes. Ninguna de éstas parece haber atraído el interés de Cavendish⁶⁶.

Henry Cavendish se sintió atraído por una estética más profunda y austera. Gozaba de un sentido casi instintivo para decidir las mediciones que más convenía realizar y dar con la mejor manera de realizarlas, y luego forzaba implacablemente la precisión de sus equipos hasta el extremo. Su primer trabajo publicado, que trataba

⁶⁶ *Ibid.*, p. 178.

sobre mediciones químicas, vio la luz en 1766, cuando contaba treinta y cinco años de edad. Su último artículo, publicado en 1809, un año antes de su muerte, trataba de mediciones astronómicas. Entre ambas, midió y pesó muchas cosas con una gran precisión. Una de esas cosas fue el mundo. El experimento de Cavendish de 1797-1798 para determinar la densidad del mundo fue su obra maestra. Llevó al extremo más absoluto su enfermizo empeño por la precisión. Hizo muchos otros descubrimientos, pero es éste el que ha llegado a conocerse como «experimento Cavendish». El *experimentum crucis* de Newton fue lo que los historiadores denominan experimento de descubrimiento, puesto que reveló una característica nueva e inesperada del mundo en un área en la que la teoría era débil. Además, Newton lo escogió de entre una larga lista de experimentos que había realizado a modo de demostración y en representación de todo su trabajo. El experimento Cavendish, en cambio, fue un experimento de medición que destacó por el extraordinario grado de precisión que lo hizo posible, no formaba parte de una serie y se basaba en una teoría relativamente bien desarrollada. El experimento sólo ganó importancia con el tiempo. Y es que mientras que Cavendish lo utilizó únicamente para medir la densidad, o de hecho el «peso» del mundo, los científicos que pusieron la Ley de la Gravitación de Newton en su forma concisa moderna encontraron en el experimento Cavendish la manera perfecta de medir el valor del importantísimo término «G», la constante de la gravitación universal.

El camino que llevó a Cavendish a este experimento comenzó, de forma típica para él, con una pregunta sobre la precisión, en concreto sobre la de los instrumentos geográficos. En 1763, el astrónomo británico Charles Mason y su compatriota el cartógrafo Jeremiah Dixon fueron enviados a las colonias británicas con el objetivo de resolver una larga disputa que enfrentaba a Pensilvania con Maryland. El resultado sería la célebre línea Mason-Dixon, una importante frontera en la historia de Estados Unidos durante los años que precedieron a la guerra de Secesión. Cavendish se preguntó sobre el grado de precisión que podían alcanzar sus medidas, teniendo en cuenta que la gran masa de las montañas Allegheny, situadas al noroeste, ejercerían una ligerísima atracción gravitatoria sobre los instrumentos de medición de Dixon y Mason, una fuerza que no quedaba compensada por una masa equivalente hacia el sureste porque el agua del océano Atlántico es mucho menos densa que la roca.

La diferencia entre las densidades de las montañas y los océanos sugería, en la mente de Cavendish, la cuestión de la densidad media de la Tierra, que revestía un gran interés no sólo para los cartógrafos, sino también para muchos otros científicos, como los físicos, los astrónomos y los geólogos.

De acuerdo con Newton, la atracción gravitatoria entre dos cuerpos era proporcional a sus densidades. La atracción gravitatoria relativa que los cuerpos astronómicos ejercían entre sí permitía conocer sus densidades relativas; Newton, por ejemplo, había estimado que Júpiter tenía una cuarta parte de la densidad de la Tierra, y sobre la

base de la densidad relativa de la materia en la superficie de la Tierra y en las minas, había calculado con sorprendente precisión su densidad, escribiendo que «es probable que la cantidad total de materia de la Tierra sea unas cinco o seis veces mayor que si la Tierra entera estuviese constituida por agua⁶⁷». Pero nadie sabía cómo medirla. Para ello era necesario determinar la fuerza de atracción entre dos cuerpos de densidad conocida. El cociente entre esta fuerza y las densidades de los objetos podía entonces compararse con el cociente entre la fuerza de atracción entre los objetos y la Tierra y determinar la densidad media de ésta. Pero los cuerpos que uno podía medir en un laboratorio ejercían una atracción gravitatoria tan minúscula que Newton y otros daban esa medición por imposible. Una alternativa consistía en medir en qué grado una masa de tierra de densidad conocida (por ejemplo, una montaña de geología uniforme y forma geométrica) tiraba de un objeto pequeño, por ejemplo una plomada suspendida de tal manera que pudiera medirse con precisión su desviación. Pero los cálculos de Newton lo llevaron al desespero: «[M]ontañas enteras no bastarían para producir un efecto sensible», escribió⁶⁸.

Aun así, la cuestión de la densidad de la Tierra era tan urgente para los astrónomos, los físicos, los geólogos y los cartógrafos que en 1772 la Real Sociedad designó un «comité de la atracción» para que

⁶⁷ Isaac Newton, *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, tr. I. Bernard Cohen y Anne Whitman, University of California Press, Berkeley, 1999, p. 815. (Hay trad. cast.: *Principios matemáticos de la filosofía natural*, Alianza, Madrid, 1998 [vol. I], 2004 [vol. II]).

⁶⁸ Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World*, tr. A. Motte, revisión de F. Cajori, Vol. 2, Greenwood Press, Nueva York, 1969, p. 570.

intentase medir la densidad de la Tierra en lo que el astrónomo Neville Maskelyne describió como un esfuerzo por «hacer más palpable la gravitación universal». El comité, entre cuyos miembros estaba Cavendish, decidió intentarlo por el método de la plomada. En 1775, la Real Sociedad patrocinó una expedición para realizar un experimento que diseñó en gran medida Cavendish pero que puso en práctica Maskelyne en una montaña escocesa grande y de forma regular llamada Schiehallion («tormenta constante»). Como no podía ser menos, el experimento hubo de retrasarse a causa del mal tiempo, pero una vez concluido Maskelyne organizó una fiesta tan salvaje con los paisanos escoceses que en ella se consumió un barril de whisky y un incendio provocado accidentalmente por uno de los participantes quemó la choza en la que se hacía la fiesta, que pasó a formar parte del folclore: se alude a ella en una balada gaélica⁶⁹.

De vuelta en Londres, un matemático calculó a partir de las observaciones recogidas que la densidad de la Tierra era unas 4,5 veces la del agua, suponiendo que el cociente entre la densidad de la Tierra y la de la montaña era $9/5$ y que la densidad de la montaña era 2,5 veces superior a la del agua. Maskelyne recibió una medalla por su medición y en el acto de concesión el presidente de la Real Sociedad se jactó de que el sistema newtoniano había quedado «completo».

Cavendish, como es obvio, no había participado en la etílica celebración, ni siquiera había estado en la montaña cuando se

⁶⁹ En Derek Howse, *Nevil Maskelyne: The Seaman's Astronomer*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989, pp. 137-138.

realizaron las observaciones. A diferencia de Maskelyne y sus colegas de la Real Sociedad, a Cavendish le preocupaban todas las suposiciones en que se basaron. ¿Quién les aseguraba que el cociente entre la densidad de la Tierra y la de la montaña era de $9/5$ y que la densidad de la montaña era 2,5 veces la del agua? Sin un conocimiento fiable de la composición de la montaña y de sus dimensiones precisas, la medición de la densidad de la Tierra sólo podía ser aproximada. Una medición precisa de la densidad de la Tierra, concluyó Cavendish, tenía que hacerse en el laboratorio utilizando cuerpos de forma y composición conocidas. El inconveniente, como bien sabía, era que la fuerza que habría que medir sería extraordinariamente pequeña. Si el eminente Newton creía que ni siquiera una montaña produciría un efecto mensurable, ¿cómo podría hacerse en el laboratorio?

En su estilo característico, Cavendish rumió en silencio sobre el problema durante años mientras trabajaba en otras cosas. Por fin comentó el problema con uno de sus pocos amigos, el reverendo John Michell. Además de ministro, Michell era un geólogo que estudiaba la estructura interna de la Tierra y había sido aceptado en la Real Sociedad en 1760, el mismo año que Cavendish. En 1783, al saber que Michell tenía algunos problemas de salud tras intentar construir un telescopio de ambiciosas dimensiones, Cavendish le escribió a su amigo que «si vuestro problema os impide

seguir con eso, confío en que por lo menos os permita dedicaros a la ocupación más fácil y menos laboriosa de pesar el mundo⁷⁰».

Michell, que como Cavendish estaba ocupado en otros experimentos, invirtió una década en la construcción del aparato para pesar el mundo, pero murió antes de poder experimentar con él. El equipo fue a parar a manos de Cavendish, que dedicó unos cuantos años a mejorarlo para conseguir una mayor precisión. Por fin, inició el experimento en el otoño de 1797. Aunque Cavendish tenía por entonces casi sesenta y siete años, se aplicó a la tarea con insólita energía, realizando observaciones durante interminables horas, indagando incansablemente sobre las fuentes de error e introduciendo sin cesar mejoras en el diseño. El artículo de 57 páginas donde presentó sus resultados fue publicado en las *Transactions* de la Real Sociedad en junio de 1798⁷¹. Dedicaba en él una sección tan larga a describir con sumo detalle sus intentos por encontrar fuentes de error que un comentarista se queja de que «se lee como una disertación sobre los errores». Comienza de manera harto sencilla:

Hace muchos años, el rev. John Michell, miembro de esta Sociedad, ingenió un método para determinar la densidad de la Tierra que se basaba en hacer sensible la atracción ejercida por cantidades pequeñas de materia; sin embargo, ocupado en otras actividades, no

⁷⁰ Citado en Russell McCormmach, «The Last Experiment of Henry Cavendish», A. Kox y D. Siegel (eds.), *No Truth Except in the Details*, Kluwer, Dordrecht, 1995, pp. 13-14.

⁷¹ Henry Cavendish, «Experiments to Determine the Density of the Earth», *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 88 (1798), pp. 469-526.

completó el aparato hasta poco antes de su muerte y no llegó a realizar con él ningún experimento...

El aparato es muy simple; consiste en una barra de madera de 1,8 metros de largo hecha de modo que combine una gran resistencia con un peso ligero. Esta barra se suspende en posición horizontal por medio de un fino cable de un metro de largo, y de cada uno de sus extremos se sujeta una bola de plomo de unos cinco centímetros de diámetro; todo el conjunto se encierra en un armazón cubierto de madera para defenderlo del viento.

Michell pretendía medir la atracción entre estas dos esferas de metal de cinco centímetros, colocadas a modo de barra de pesas a cada extremo de la barra suspendida del techo, y dos esferas de unos veinte centímetros que podían situarse cerca de las bolas pequeñas. El experimento consistía en ir acercando poco a poco las esferas grandes a las bolas pequeñas unidas a la barra. Dicho de otra forma, si miráramos el aparato desde el techo y las bolas pequeñas se situaran, por ejemplo, a las 12.00 y las 6.00, entonces las esferas mayores se situarían a las 1.00 y las 7.00. La atracción entre cada par de bolas (una grande y una pequeña) haría que la barra se moviese. Como el cable de metal que sujeta la viga es flexible, este movimiento adoptaría la forma de una leve oscilación. Midiendo esta oscilación, Michell podría calcular la fuerza de atracción entre las bolas. Esta información, junto con la fuerza de atracción entre las bolas y la Tierra, que era conocida, bastaba para determinar la densidad media de la Tierra.

Pero el segundo párrafo del artículo de Cavendish deja clara la principal dificultad de este método: la fuerza de atracción entre las bolas sería extremadamente pequeña, de alrededor de la cincuenta millonésima parte de su peso. «[E]s obvio», escribe Cavendish, «que la más diminuta fuerza externa bastaría para dar al traste con el éxito del experimento». La más mínima corriente de aire, fuerza magnética o cualquier otra influencia externa lo haría imposible. Por ello, en cuanto llegó a sus manos el equipo de Michell, «decidí volver a hacerlo en su mayor parte», escribe Cavendish, al considerar que no era «tan adecuado como hubiera deseado».

«Adecuado» era un eufemismo. Cavendish trabajó con gran tesón y firmeza para mejorar su precisión. Lo primero que hizo fue hacer más grandes las esferas, que pasaron de veinte a treinta centímetros de diámetro y unos 160 kilos de peso cada una. Aun así era importante proteger el aparato de cualquier fuerza que pudiera perturbarlo, algo que, por fortuna, Cavendish estaba dispuesto a hacer hasta los extremos más inverosímiles. La necesidad de reducir y controlar esas fuerzas era el desafío perfecto para su naturaleza obsesiva.

El problema más inmediato y difícil concernía a las diferencias de temperatura dentro de la habitación. Si una parte del equipo se encontrara a una temperatura siquiera un poco mayor que su entorno, el aire de su alrededor ascendería, creando corrientes de aire en la habitación que alterarían la posición de la barra. El calor corporal de una sola persona dentro de la estancia o el calor de una lámpara serían del todo inaceptables.

Como estaba convencido de la necesidad de proteger el equipo frente a esta fuente de error, decidí colocar el aparato en una habitación que estaría siempre cerrada y observar el movimiento de la barra desde el exterior con la ayuda de un telescopio, además de suspender los pesos de plomo de tal manera que pudiera moverlos sin necesidad de entrar en la habitación.

Así pues, Cavendish instaló el remozado aparato de Michell en el interior de una habitación sellada de un pequeño edificio de su jardín de Clapham. Pero para que el experimento se pudiera ejecutar sin entrar en esta habitación fue necesario rediseñar todavía más el aparato. Cavendish montó las dos esferas grandes en un sistema de poleas de manera que se pudieran desplazar lentamente desde el exterior (figura 5.1).

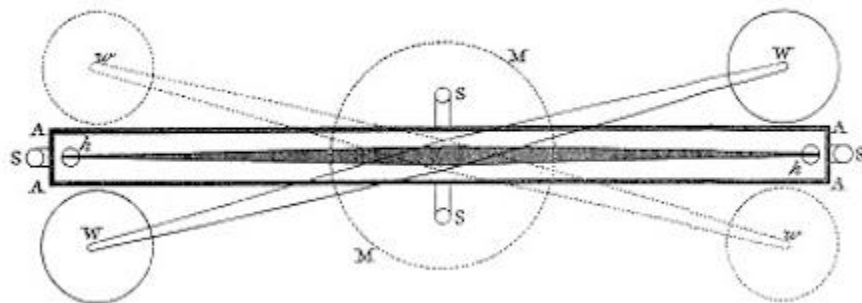


Figura 5.1. Diagrama de Cavendish donde se puede ver el par de bolas montadas en cada extremo de una viga encerrada en una caja. En el exterior, las pesas de mayor tamaño pueden acercarse a las pequeñas.

A cada una de las bolas sujetas a la barra unió unos indicadores de marfil que apuntaban a una escala de Vernier que permitía determinar su posición con una precisión inferior a una centésima de pulgada (una cuadragésima parte de centímetro), e instaló telescopios en las paredes para poder leer estos indicadores desde el exterior de la habitación. Como pretendía realizar el experimento casi en la oscuridad, colocó sobre cada telescopio unas lámparas con unas lentes que enfocaban la luz, a través de unas diminutas ventanas, sobre la escala.

La ejecución del experimento consistía en acercar muy lentamente los pesos mayores hacia la caja que contenía la barra con las bolas de menor peso. La atracción entre los pesos produciría un desplazamiento de la barra. La medición de las diminutas oscilaciones que este movimiento provocaría comportaba hasta dos horas y media de observación atenta y constante.

La reconstrucción de este aparato con el fin de conseguir un grado extremo de precisión hizo que Cavendish tuviera que enfrentarse a lo que se conoce como el «compromiso del experimentador». Cada pieza tiene que ser tan resistente y precisa como sea necesario, pero no más, ya que de lo contrario se pueden producir efectos indeseables sobre otras partes del aparato. Por ejemplo, unir a la barra unas bolas más grandes aumentaría el efecto, pero también reduciría la precisión a causa de la tensión ejercida sobre la barra y sobre el cable que la sujeta al techo. Si para compensar este efecto se reforzara la barra, se ejercería más tensión sobre el cable. Si para compensar se pusiera un cable más fuerte, crecería la fuerza

necesaria para mover la barra y se reduciría la sensibilidad del experimento, contrarrestándose así el efecto que se buscaba al poner unas bolas más grandes. El genio de Cavendish radica en su habilidad para determinar, para cada una de las piezas del aparato, el compromiso óptimo que maximizara a un tiempo el efecto y la precisión del experimento.

Aunque la principal preocupación de este científico eran las corrientes de aire, le preocupaba también la contribución de la atracción gravitatoria de las barras metálicas utilizadas para suspender las esferas pesadas y desplazarlas hacia las bolas más pequeñas. Esto lo llevó a quitar las esferas y medir la atracción de las barras, y a sustituir después éstas por otras de cobre para determinar si ejercían alguna atracción magnética. Cavendish se preguntó también si el cable que utilizaba para suspender la barra de madera era suficientemente elástico; experimentó con el cable, y aunque sus resultados indicaban que tenía la elasticidad requerida, lo reemplazó por otro que consideró todavía mejor. Intranquilo ante la posibilidad de que las bolas pequeñas de metal hubieran adquirido una cantidad minúscula de magnetismo a causa de estar orientadas del mismo modo en el campo magnético terrestre durante demasiado tiempo, las giró para contrarrestar este efecto y luego reemplazó las bolas por imanes para medir la atracción que pudiera ejercer el magnetismo de estar presente. Éste es un ejemplo de lo que se conoce como «vigilancia del experimentador»: si se sospecha de la presencia de un efecto perturbador en un experimento, conviene magnificarlo lo suficiente como para medirlo,

de modo que se pueda compensar con precisión. Cavendish indagó sobre la atracción gravitatoria entre la caja de caoba que encerraba la barra de madera, las bolas pequeñas y las esferas de mayor tamaño, y aunque sus mediciones indicaron que era insignificante, dedicó a esta cuestión un apéndice completo de su artículo. Esto requería algo más que un cuidado y atención maniáticos. Para evaluar lo que ocurría en cada caso y lograr descubrir, medir y compensar cualquier fuerza que pudiera ejercer un efecto no deseado, el británico tuvo que echar mano de su vasto dominio del conocimiento científico de la época, de la electricidad al magnetismo, la conducción de calor, las matemáticas o la gravitación.

Henry Cavendish conocía la densidad de los dos pares de bolas y la fuerza de atracción entre las bolas y la Tierra. Una vez establecida la fuerza de atracción entre los dos pares de bolas, utilizó el cociente entre la fuerza de atracción entre estos objetos y sus densidades para calcular la densidad media de la Tierra. «A raíz de los experimentos», concluye, «la densidad de la Tierra puede establecerse en 5,48 veces la del agua», un resultado que, según añade con evidente satisfacción, se ha determinado «con gran exactitud». Con cierto regocijo, señala a renglón seguido la discrepancia entre su resultado y el obtenido veinticinco años antes con tanta fanfarria en Schiehallion, indicando que su medición «difiere de la determinación anterior bastante más de lo que hubiera esperado». No obstante, Cavendish añade, con la prudencia y modestia que lo caracterizan, que suspenderá su juicio «hasta haber

examinado con mayor cuidado en qué medida la medición anterior pudiera haberse visto afectada por irregularidades cuya magnitud no puedo evaluar en este momento».

Poco antes, en su artículo menciona Cavendish que una fuente potencial de corrientes de aire producía «un defecto que pretendo rectificar en futuros experimentos». Es obvio que consideraba el experimento entero una obra inacabada, un respiro momentáneo en su búsqueda de una precisión todavía mayor. No le faltaban ideas para mejorarla.

Pese a ello, no intentó realizar el experimento nunca más, aunque muchos otros sí lo hicieron. Durante el siglo siguiente, el experimento fue reproducido muchas veces por científicos que, con nuevas técnicas, buscaban una mayor precisión. Sólo lograron mejoras nimias. Curiosamente, el mayor error de su experimento se debió, como descubrió más tarde otro científico, a una equivocación matemática extremadamente rara.

Pero ocurrió algo interesante durante esos cien años: el propósito del experimento evolucionó. El valor de la densidad media de la Tierra se tornó menos interesante para la ciencia que el valor de un término de la ecuación que corresponde a la formulación moderna de la Ley de la Gravitación Universal de Newton. En términos modernos, lo que Newton había establecido es que la fuerza gravitatoria de atracción F entre dos cuerpos esféricos de masa M_1 y M_2 separados por una distancia r depende del producto de esas masas dividido por la distancia que los separa elevada al cuadrado y multiplicado este cociente por una constante que representa la

potencia de la fuerza de la gravedad, o «G». O sea, $F = GM_1M_2/r^2$. Aunque Cavendish no conoció las leyes de Newton en esta forma y la constante crucial G no aparece en su artículo, científicos posteriores se dieron cuenta de que se podía medir de forma sencilla con su experimento de maravillosa precisión. Pronto el experimento pasó a realizarse con ese propósito y no con el original de determinar la densidad de la Tierra. Como escribió un científico que realizó el experimento en 1892, «A causa del carácter universal de la constante G, me parece que es bajar de lo sublime a lo ridículo describir el objeto de este experimento como la determinación de la masa de la Tierra o su densidad media o, con menor precisión, el peso de la Tierra⁷²».

Casi cincuenta años después de la muerte de Cavendish, en la década de 1870, se construyó en la Universidad de Cambridge un laboratorio hoy famoso que lleva su nombre y que fue financiado por el rector de la universidad, un pariente lejano del científico.

En la actualidad los estudiantes realizan el experimento de Cavendish utilizando los mismos elementos básicos pero tecnologías de medición más avanzadas, por ejemplo rayos láser que se reflejan en espejos colocados en las bolas pequeñas para medir el grado de desviación de la barra. Ejecutado de la manera adecuada, el experimento pone de manifiesto la magnitud de la fuerza que mantiene unida toda la materia, el universo entero. A partir de este número se puede calcular el comportamiento de los objetos en

⁷² Citado en B. E. Clotfelter, «The Cavendish Experiment as Cavendish Knew It», *American Journal of Physics* 55 (1987), 210-213, en la p. 211.

órbita alrededor de la Tierra, el movimiento de los planetas del sistema solar y el de las galaxias desde el Big Bang.

El siempre ambivalente Wilson escribió sobre el sujeto de su biografía:

Fue uno de los benefactores de su raza a quien menos gratitud se ha expresado, siempre enseñando y sirviendo con paciencia a la humanidad mientras ésta rehuía su frialdad o se mofaba de sus peculiaridades. No podía cantar para ellos una dulce canción o crear una «obra bella» que ofreciera un «gozo eterno», ni tocarlos en el corazón o encender su espíritu o hacer más profunda su reverencia o su fervor. No fue poeta ni pastor de la Iglesia ni profeta, sino sólo una inteligencia fría y clara que desprendía una luz blanca y pura que iluminaba todo lo que tocaba pero no calentaba nada; una estrella por lo menos de segunda magnitud, si no de primera, en el firmamento intelectual⁷³.

La belleza que Cavendish creó era de un orden muy distinto. El instrumento que utilizó era desgarrado; el proceso, tedioso; las matemáticas, complejas. Aun así, gracias a su rigor metodológico, al modo en que fue acorralando las fuentes de error y reemplazando las piezas no esenciales hasta por fin tener a tiro su presa, el experimento Cavendish sigue destacando por su belleza metódica, austera y descarnada.

Interludio

⁷³ Wilson, *op. cit.*, p. 186.

Ciencia y cultura popular

A decir verdad, la balada gaélica que menciona a Maskelyne, *A Bhan Lunnainneach Bhuidhe*, no tiene nada que ver con la ciencia ni con el experimento de Schiehallion para medir la densidad de la Tierra, ni siquiera con la fiesta que se celebró al finalizarlo. La balada fue escrita por un violinista que asistió a la fiesta y habla de su violín («mi riqueza y mi amor»), que se quemó en el incendio que causaron los juerguistas. Maskelyne aparece sólo porque cumplió con la promesa de proporcionarle un nuevo violín.

Así que la balada es una ilustración más de la ciencia acordonada y separada de la cultura popular. En las películas, por ejemplo, la ciencia suele aparecer como pretexto para alguna otra cosa (una persecución, la búsqueda de un culpable, un conflicto entre el bien y el mal) y pronto pasa a un segundo plano. Los personajes que representan científicos aparecen en un abanico estrecho de papeles superficiales, como el villano listo y malo o el maniático de la técnica, bueno en su campo pero por lo demás incompetente, antipático y socialmente inepto. En las películas *E.T.* y *1, 2, 3... Splash*, los fríos e insensibles científicos a punto están de matar a unos protagonistas vitales pero indefensos.

Es mucho lo que está en juego en la forma en que el arte y la cultura popular integran la ciencia y los temas científicos, puesto que son foros importantes en los que la sociedad procesa sus ambiciones y ansiedades. La falta generalizada de éxito del arte y la cultura popular a la hora de incorporar correctamente la ciencia y los temas científicos es preocupante si se tiene en cuenta lo

fundamental e inextricablemente unida que se encuentra la ciencia a la vida contemporánea, y así ha ocurrido desde los tiempos de Galileo. Los estereotipos continuamente reciclados de la ciencia como una empresa fría y distante hacen que parezca todavía más impersonal y remota, y por tanto amenazadora y potencialmente peligrosa. Además, socava cualquier intento por promover la apreciación de la belleza en la ciencia porque nos impide ver lo profundamente que la ciencia impregna el mundo y sus maravillas. Integrar ciencia y arte es difícil incluso para los artistas mejor intencionados; a quien le parezca que para percibir la belleza de los experimentos científicos se requiere preparación, debería enfrentarse a ciertas obras de arte inspiradas en la ciencia. Pudieron verse muchos ejemplos en 2003, el año en que se celebró el cincuenta aniversario del descubrimiento de la estructura del ADN y se dedicaron a este tema varias exposiciones de arte. Inspirada por ellas, a la crítica de arte del *New York Times* Sarah Boxer se le ocurrió que «como el ADN, el arte del ADN necesita ser descodificado», para luego comparar su experiencia en algunas galerías a una velada musical en la cual se oyera constantemente un murmullo de alguien que le susurra al oído lo que significa cada frase. «[S]i desea comprender las conexiones con el ADN», escribió Boxer, «le espera mucha lectura⁷⁴».

A juzgar por su capacidad para representar complejas situaciones humanas, el teatro podría ser un buen foro para integrar la ciencia.

⁷⁴ Sarah Boxer, «The Art of the Code, or, At Play with DNA», *The New York Times*, 14 de marzo de 2003, p. E35.

Pero incluso aquí las verdades históricas y científicas se suelen alterar con el fin de hacer que la situación humana parezca más plausible o incluso presentable. Un ejemplo es la obra de Heinar Kipphardt *In the Matter of J. Robert Oppenheimer*. Basada en transcripciones de la famosa vista judicial celebrada en 1954 en la que Oppenheimer, el principal responsable del éxito del Proyecto Manhattan, intentó que se le devolviera la autorización de seguridad que se le había revocado, sobre todo porque había irritado a sus enemigos con su inicial oposición a la bomba de hidrógeno, pero también a causa de su pasado de izquierdas. A Kipphardt, sin embargo, le pareció necesario inventar un discurso final ficticio para Oppenheimer y realizar algunos otros reajustes, a todos los cuales se opuso firmemente el propio Oppenheimer. (Trabajó con un actor-director francés en una nueva versión de la obra de Kipphardt, pero su versión, aunque históricamente más precisa, carecía de la fuerza escénica de la original).

Entre los autores de teatro cuya obra demuestra sensibilidad hacia la ciencia (es decir, que utilizan de forma eficaz imágenes, ideas o términos científicos para obtener un efecto teatral) se cuenta Tom Stoppard en obras como *Hapgood* y *Arcadia*. Entre los científicos cuya obra demuestra sensibilidad teatral (es decir, que utilizan de forma eficaz las técnicas teatrales para representar cuestiones científicas) se incluye a Carl Djerassi en su obra *The Immaculate Misconception*, y Djerassi y Roald Hoffmann en su obra *Oxygen*.

Una de las pocas obras que integran ciencia y teatro de forma plena y eficaz es *Copenhagen*, de Michael Frayn, cuyos tres protagonistas

son los dos científicos Werner Heisenberg y Niels Bohr y la esposa de Bohr, Margarethe. Ha dado mucho que hablar el hecho de que en esta obra una parte del público se siente en el proscenio, en unos bancos que recuerdan los de los tribunales populares, de cara a la platea. Se quiere sugerir así que todo observador es observado y ningún observador puede observarse a sí mismo, en un equivalente teatral del principio de indeterminación. No es ésta, a mi entender, la mejor manera de consignar la originalidad de la obra, puesto que la autoconciencia de las acciones teatrales en tanto que artefactos producidos es tan vieja como el propio teatro. Más notable, aparte de esencial para la lograda integración de ciencia y teatro en esta obra, es el papel de Margarethe, que en cierto sentido cumple la función del antiguo coro. Es ella quien nos representa en la obra. Pero no es simplemente una observadora, una persona lega en ciencia que mira y admira y exige ser informada en un lenguaje corriente, sino que se implica en los eventos que le toca vivir y en los que incluso llega a participar literalmente, pues a Niels Bohr le resultaba extremadamente difícil escribir (hay quien piensa que era disléxico), y dictaba la mayor parte de su trabajo y correspondencia a otros, entre ellos a su esposa. Así que, al menos en parte, era una cómplice que no se puede permitir la ilusión de apartarse de unos acontecimientos que ella misma cuestiona.

Margarethe nos recuerda hasta qué punto todos estamos implicados en la ciencia. Hay quien ve en la ciencia poco más que una corporación gigante inmersa en la sociedad. Pero la ciencia está tan íntimamente entretejida con la sociedad contemporánea, forma una

parte tan integral de cómo nos entendemos a nosotros mismos y nuestra relación con el mundo, que es imposible situarnos fuera de ella. La ciencia no es tanto una corporación como, por así decirlo, el sistema entero del comercio, en el que cualquier modificación reverbera por toda la sociedad de maneras múltiples e imprevistas. Este tejido íntimo e inextricable de ciencia y sociedad y comprensión de nosotros mismos sugiere que *Copenhague* no debería ser una excepción, que podrían y deberían escribirse cientos de obras como ésta. Implica también que en lo que ya consideramos bello hay más ciencia de la que creíamos.

Capítulo 6

Luces y ondas

La lúcida analogía de Young

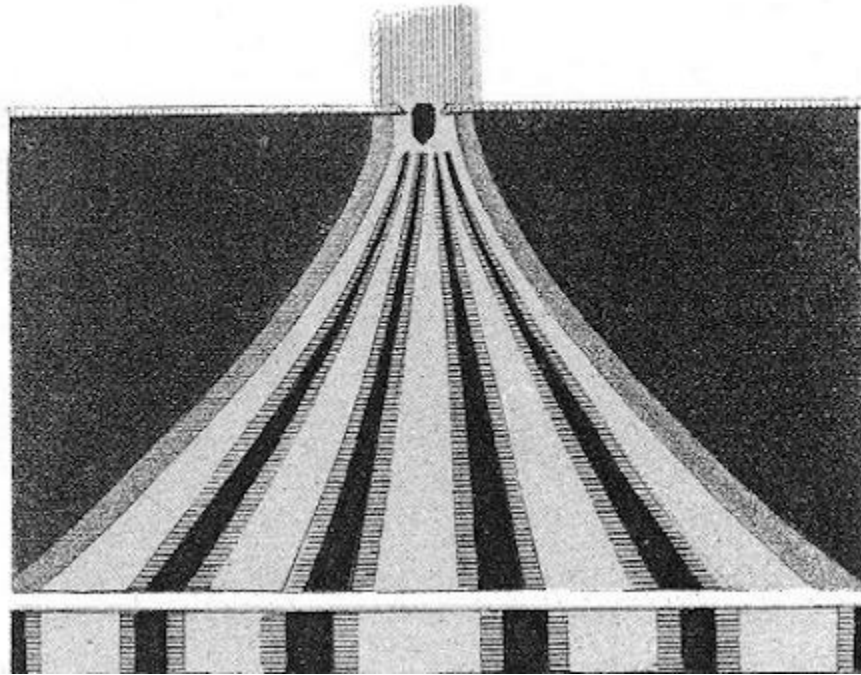


Diagrama de Thomas Young de un patrón de interferencia (abajo) producido por el paso de luz (arriba) por dos rendijas situadas muy cerca la una de la otra.

El inglés Thomas Young (1773-1829) recibió una educación estricta como miembro de la Sociedad de Amigos (cuáqueros). Y si bien al cumplir los veintiún años de edad había dejado de ser un practicante activo de esta religión y disfrutaba con la música, las artes, el baile o la hípica, su formación como cuáquero influyó enormemente en su carácter, al que impartió tanto fortalezas como debilidades. Como corresponde al ideal cuáquero, era sencillo, cortés y directo, con una mente independiente y tenaz, rasgos que

sin duda lo ayudaron a descubrir la naturaleza «ondulatoria» de la luz en contraposición a la concepción, promovida por Newton, de la naturaleza «corpuscular» de ésta. Pero Young también mostraba la propensión cuáquera a un laconismo rayano en la frialdad. Resultaba frustrante para muchos su tendencia a proclamar con plena seguridad una conclusión tersa sin molestarse en explicar el razonamiento que la apoyaba. En más de una ocasión, este rasgo de su carácter dificultó su carrera y la recepción de su trabajo.

Por otro lado, su franqueza y economía quedan reflejadas en su capacidad para concebir demostraciones directas y totalmente irrefutables. La más famosa es su experimento de la doble rendija, más conocido como «experimento de Young», una prueba asombrosamente sencilla de que la luz, pese a lo que sostenía Newton, se comporta como si fuera una onda y no como una corriente de diminutas partículas. El experimento de Young es un ejemplo clásico del uso eficaz de la analogía en la ciencia. Al mostrar de manera tan lúcida que la luz se comportaba como ondas, produjo un «destello ontológico», la revelación de un nuevo significado mediante la evidencia de que algo es fundamentalmente diferente de como se había entendido antes⁷⁵.

La mente prodigiosa de Young comenzó a manifestarse poco tiempo después de su nacimiento en 1773. A los dos años ya leía, y con seis había leído la Biblia de cabo a rabo ¡dos veces! y había comenzado a aprender latín por su cuenta. Pronto dominaba más de una docena

⁷⁵ La frase «destello ontológico» es de Mary Gerhart y Ailan M. Russell, *Metaphoric Process: The Creation of Scientific and Religious Understanding*, Texas Christian University Press, Fort Worth, 1984, p. 114.

de lenguas. Fue uno de los primeros en descifrar jeroglíficos egipcios y desempeñó un papel esencial en la descodificación de la piedra de Rosetta⁷⁶.

De 1792 a 1799, Young estudió medicina, aunque a la larga no tuvo éxito como doctor por culpa, en parte, de su poca habilidad para reconfortar a sus pacientes. En esta época comenzó a interesarse por la visión y, en particular, por la estructura del ojo humano, una lente extraordinariamente adaptable y compleja. Otros estudios médicos despertaron su interés por el sonido y la voz humana, y fue entonces cuando comenzó a preguntarse si el sonido y la luz no serían parecidos en su naturaleza. Ya se sabía que el sonido tenía su origen en ondas transmitidas por el aire, y Young llegó a la convicción de que la luz también consistía en ondas. Esta idea desafiaba la teoría corrientemente admitida según la cual la luz estaba formada por partículas diminutas, o «corpúsculos, en la terminología de Newton, que viajaban en línea recta desde su fuente hasta el ojo.

Durante la década de 1660, diversos científicos habían señalado algunos aspectos ondulatorios de la luz. Uno de ellos era la difracción. El científico italiano Francesco Grimaldi había observado que cuando la luz atraviesa una rendija pequeña para proyectarse en una pared, los márgenes de la estrecha banda de luz aparecen ligeramente borrosos, lo que parece indicar que la luz se difracta, es decir, que se desvía ligeramente en los márgenes de la rendija. Otro

⁷⁶ Estos y otros detalles de la vida de Thomas Young proceden de George Peacock, *Life of Thomas Young*, J. Murray, Londres, 1855, y del artículo de Edgar Morse sobre Thomas Young en *The Dictionary of Scientific Biography*, Vol. 14, Scribner's, Nueva York, 1976, pp. 562-572.

era la refracción, la desviación de un rayo de luz al penetrar en otro medio, que Robert Hooke, la némesis de Newton, había señalado que se podía explicar mejor si la luz consistía en ondas que si estaba formada por corpúsculos. El científico danés Erasmus Bartholin había estudiado el extraño fenómeno de la doble refracción, que se había observado en el espato de Islandia, cierto tipo de cristal descubierto durante una expedición a la isla en 1668. Cuando un rayo de luz atraviesa este cristal, se divide en dos rayos que se comportan de manera distinta, un fenómeno que desconcertaba a los científicos de la época y que parecía difícil de explicar con la teoría corpuscular de la luz.

Pero estas cuestiones eran casi nimias, raras excepciones que tentaban a los científicos a pasarlas por alto, y más cuando no estaba claro que tuvieran relación entre ellas ni de qué naturaleza. El propio Newton había elaborado argumentaciones convincentes en contra de la concepción ondulatoria, había señalado muchas observaciones que la contradecían y confiaba en que tarde o temprano se hallase una explicación para las pequeñas anomalías de la difracción y la refracción. Tal como Newton escribió en su *Óptica* de 1704, las ondas no viajan en línea recta sino que se desvían al chocar contra los objetos que encuentran en su camino, algo que la luz no parecía hacer.

Cuando las ondas de la superficie de un estanque pasan por los lados de un obstáculo grande que frena a algunas de ellas, se desvían después y se dilatan gradualmente hacia las aguas quietas situadas detrás del obstáculo. Las ondas, pulsos o vibraciones en el

aire, en las que consisten los sonidos, se desvían de modo evidente, aunque no tanto como las ondas en el agua. Así, una campana o un cañón pueden oírse del otro lado de una colina que oculte a la vista el origen del sonido; y los sonidos se propagan de igual modo a través de tubos torcidos que a través de tubos rectos. La luz, en cambio, nunca sigue una trayectoria sinuosa... Y así las estrellas fijas dejan de verse por interposición de cualquier planeta...⁷⁷

Pese a la autoridad de Newton, a Young le fascinaba la idea de que el sonido y la luz fuesen fenómenos análogos. Como su consulta médica apenas le robaba tiempo o interés, pudo dedicarse de lleno a la investigación científica de esta cuestión. Asistía con regularidad a las reuniones de la Real Institución, una organización recién fundada que se proponía divulgar «el conocimiento de mejoras mecánicas útiles» y «enseñar la aplicación de la ciencia a los propósitos útiles de la vida», y acabó por abandonar la medicina para unirse al profesorado de esta institución en 1801. Una de sus principales ocupaciones consistía en preparar e impartir una serie de conferencias para los miembros de la institución sobre «la filosofía natural y las artes mecánicas». Estas conferencias nos permiten ver los puntos fuertes de Young como científico profesional. De hecho, son una mina para los historiadores de la ciencia, porque resumen de forma precisa y concisa prácticamente el espectro completo del conocimiento científico de la época; leyéndolas, cuesta imaginar alguna rama de la ciencia sobre la cual

⁷⁷ Newton, *Opticks*, Cuestión 28.

Young no estuviese tan informado como cualquier especialista. No sólo eso, sino que el británico utilizaba sus conferencias como vehículo para presentar conceptos nuevos y fundamentales; en una de ellas, los asistentes oyeron la palabra «energía» utilizada por primera vez con su significado científico actual. No obstante, asistir a las conferencias de Young debía de ser una prueba difícil a juzgar por su estilo abreviado y apocopado que, unido a la enorme amplitud de las materias que trataba, debían de convertir sus conferencias en un acuciante y agotador *tour de force* intelectual. De hecho, Young sólo fue profesor de la Real Institución durante dos años, hasta que la Real Sociedad le encontró una posición más adecuada a sus talentos, y en particular a su dominio de las lenguas, como secretario de Asuntos Exteriores, una posición que conservó durante el resto de su vida.

Pero fue en 1800, el año anterior a su incorporación al profesorado de la Real Institución, cuando Young publicó su primer trabajo importante sobre la analogía entre luz y sonido, con el título «Esquema de experimentos e indagaciones sobre el sonido y la luz⁷⁸». Todavía le llevaría varios años dar con el experimento que hoy lleva su nombre y que sellaría para siempre la analogía, pero su artículo de 1800 fue un primer paso importante y un hito en la literatura científica, pues en él se describe por vez primera el concepto en el que se basaría después su famoso experimento, la interferencia, o el modo en que, cuando dos ondas se cruzan, su

⁷⁸ Thomas Young, «Outlines of Experiments and Inquiries Respecting Sound and Light», *Philosophical Transactions* 1800, pp. 106-150.

movimiento resultante combina los efectos del movimiento de cada una de las ondas por separado. «Interferencia» es un nombre desafortunado para este fenómeno, puesto que sugiere algo ilegítimo, corrupto o degradado, cuando en realidad lo que sucede es que dos cosas se combinan para crear algo nuevo. Quizá dándose cuenta de esto, Young utilizaba en ocasiones un término más elegante, «coalescencia».

Newton había prefigurado la idea de interferencia en su explicación de las mareas en Batsha, un puerto del reino de Tongkin cerca de la actual Haiphong en Vietnam. Los mercaderes británicos del siglo XVII que buscaban el comercio con Tongkin sabían que sus aguas costeras eran peculiares. En 1684, un viajante inglés que había pasado algún tiempo en Batsha publicó una carta en las *Philosophical Transactions* en la que describía la curiosa pauta que seguían las mareas: cada catorce días no había marea en absoluto, es decir, durante ese día el nivel del mar ni subía ni bajaba, y en medio se producía una única marea que aumentaba lentamente hasta alcanzar un pico a los siete días y luego descendía. Este extraño comportamiento atrajo el interés de los científicos y Newton propuso una explicación en su obra magna, los *Principia* (1688). Las mareas oceánicas, decía, alcanzaban el puerto desde dos mares diferentes, el mar de China y el océano Índico, a través de dos canales de distinta longitud, de manera que una llegaba a las seis horas y la otra a las doce. El efecto combinado por el cual la marea alta procedente de una dirección a menudo compensaba la marea baja procedente de la otra, eliminaba una de las mareas y, en dos

ocasiones durante cada mes lunar, las dos, de manera que el nivel del mar no cambiaba⁷⁹. Pero aunque esto se interpreta hoy como un caso de interferencia entre ondas, Newton no llegó a generalizar su explicación hasta concebirla como una propiedad de las ondas, sino que lo vio simplemente como el efecto de la superposición de movimientos particulares que sólo ocurrían en un lugar especial.

El artículo de Young de 1800 sólo discute el concepto de la interferencia en relación con las ondas de sonido y no lo generaliza de forma explícita a la luz, pese a que la mayor parte del artículo versa sobre ésta. La idea novedosa de Young consistía en identificar la interferencia, en percatarse de que era una característica básica de las ondas y en comprender que se producía de manera simultánea en muchos lugares siempre que se cruzan dos o más ondas. No obstante, su escrito oscureció la originalidad del concepto e incluso su papel en su invención. Young no atrajo la atención hacia el concepto, sino que simplemente se limitó a describir el hecho de que cuando las ondas de sonido se cruzan, cada partícula del medio (por ejemplo, moléculas del agua o del aire) participan de los dos movimientos. No reclamó la autoría del descubrimiento, sino que lo presentó como algo obvio y bien conocido que explicaba modestamente sólo como corrección al trabajo de otro científico⁸⁰.

⁷⁹ J. D. Mollon, «The Origins of the Concept of Interference», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* (2002), pp. 360, 807-819. La discusión del propio Newton se encuentra en los *Principia*, Libro 3, proposición 24.

⁸⁰ He aquí, pues, una de las más oscuras y enrevesadas introducciones de un concepto fundamental de toda la historia de la ciencia: «Es sorprendente que un gran matemático como el Dr. Smith haya podido considerar siquiera por un momento la idea de que las vibraciones que constituyen los distintos sonidos puedan cruzarse entre sí en todas las direcciones, sin afectar a las mismas partículas del aire con sus fuerzas unidas: indudablemente se cruzan, sin

Al año siguiente, Young extendió el concepto de interferencia al agua y a la luz. Más tarde escribiría:

Fue en mayo de 1801 cuando descubrí, al reflexionar sobre los bellos experimentos de Newton, una ley que a mi entender explica una variedad mayor de interesantes fenómenos que cualquier otro principio óptico hasta ahora publicado.

Intentaré explicar esta ley por medio de una comparación. Supongamos cierto número de ondas de agua iguales que se muevan sobre la superficie de un estanque con una velocidad constante hasta alcanzar un canal estrecho por donde desagua éste. Supongamos ahora que otra causa semejante haya provocado otra serie igual de ondas, que llegan al mismo canal con la misma velocidad y al mismo tiempo que las primeras. Ninguna de las dos series destruirá a la otra, sino que sus efectos se combinarán: si entran en el canal de tal manera que las elevaciones de una de las series coincidan con las de la otra, conjuntamente producirán una serie de elevaciones mayores; pero si las elevaciones de una serie están situadas de tal manera que coincidan con las depresiones de la otra, se rellenará de forma exacta esa depresión y la superficie del agua se mantendrá lisa; al menos no puedo descubrir ninguna alternativa ni a partir de la teoría ni a partir de la experimentación.

perturbar mutuamente su progreso; pero esto no puede suceder de otro modo que si cada partícula participa de ambos movimientos», Young, «Outlines», sección 11.

*Mantengo además que efectos semejantes se producen cuando dos porciones de luz se mezclan del mismo modo, y a esto llamo Ley General de la Interferencia de la Luz*⁸¹.

En la interferencia de las ondas de agua, las elevaciones (el término técnico es «amplitud») de ondas distintas pueden combinarse de modo que se refuercen, formando en algunos lugares elevaciones mayores, mientras que en la «interferencia destructiva» las elevaciones y las depresiones de las distintas ondas pueden combinarse de modo que la superficie del agua no cambie. Algo parecido ocurre con la interferencia de la luz, y en este caso la amplitud de una onda de luz se corresponde con su intensidad. Allí donde las amplitudes de las ondas de luz interfieren de modo que se refuercen entre sí, formarán manchas de mayor intensidad luminosa; cuando las amplitudes se produzcan en direcciones opuestas, se cancelarán entre sí y formarán manchas oscuras.

Young puso a trabajar su concepto de interferencia y no tardó en arrojar luz sobre muchos fenómenos antes desconcertantes. El caso más llamativo fue su explicación de los anillos de Newton, la serie de bandas concéntricas que aparecen cuando se coloca una lente convexa sobre una placa de vidrio. Young elaboró la explicación de Newton añadiendo que las áreas oscuras de estos anillos son el resultado de una interferencia negativa.

⁸¹ Thomas Young, *A Reply to the Animadversions of the Edinburgh Reviewers*, Longman et al. Cadell & Davis, Londres, 1804.

Aunque las explicaciones de Young fueran a veces oscuras, sus demostraciones experimentales no lo eran; al contrario, eran simples y claras, como correspondía a su profundo conocimiento del tema. En 1803, por ejemplo, leyó un artículo ante la Real Sociedad titulado «Experimentos y cálculos relativos a la óptica física», que comenzaba del siguiente modo:

Al realizar ciertos experimentos sobre los márgenes de color que acompañan a las sombras he hallado una prueba tan simple y demostrativa de la Ley General de la Interferencia entre dos porciones de luz... que considero apropiado exponer ante la Real Sociedad una breve comunicación de los hechos que me parecen tan decisivos... [L]os experimentos que a continuación relataré... pueden ser repetidos con gran facilidad en días soleados y sin necesidad de aparatos que no estén al alcance de todos.⁸²

En el primero de estos experimentos, Young utilizó una aguja para practicar un orificio minúsculo en una gruesa hoja de papel que había utilizado para tapar una ventana, haciendo de este modo que un fino haz de luz fuera a proyectarse contra la pared opuesta. Cuando interpuso una «tira de cartón de aproximadamente una trigésima parte de una pulgada [unos 0,8 milímetros] de anchura» en ese haz de luz de Sol, creó una pequeña sombra con márgenes de colores no sólo a cada lado de la sombra, sino incluso difractados en el interior de la propia sombra. En esta sombra observó la serie de

⁸² Thomas Young, «The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics», *Philosophical Transactions* 1804, pp. 1-16.

bandas paralelas claras y oscuras que hoy reconocemos como la signatura distintiva de los patrones de interferencia.

En las conferencias que preparó para la Real Institución, publicadas en 1807, sus diagramas y demostraciones eran espectaculares. Su decimotercera conferencia, «Sobre la teoría de la hidráulica», aplica el concepto de interferencia a las ondas del agua. Para ilustrarlo, construyó un tanque somero con dos fuentes de ondas en el que las crestas y los valles de los dos conjuntos de ondas producían un patrón de interferencia estacionario que podía apreciarse con mucha claridad. Este dispositivo fue el prototipo de los tanques de ondas que resultarán familiares a muchos estudiantes de física (figura 6.1).

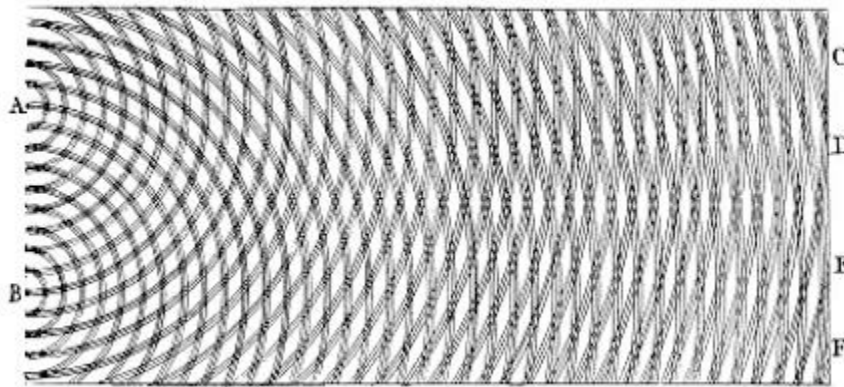


Figura 6.1. Diagrama de Young de un patrón de interferencia producido por una serie de ondas procedentes de dos fuentes distintas.

En su trigésimo novena conferencia, «Sobre la naturaleza de la luz», Young aplica a la luz el concepto de la interferencia. Para

acompañar a esta conferencia, ideó una demostración que no sólo es la manera más directa de ilustrar la interferencia de la luz sino también la demostración clásica de que la luz actúa como una onda.

Young describe su demostración del siguiente modo:

[U]n haz de luz homogénea cae sobre una pantalla en la cual hay dos orificios o rendijas muy pequeños que pueden considerarse centros de divergencia y desde los cuales la luz es difractada en todas direcciones.

Los dos orificios o rendijas actúan como dos fuentes de ondas del mismo modo que las dos fuentes del tanque de ondas. Pero si en el tanque de ondas se puede ver el patrón de interferencia como dos conjuntos de círculos superpuestos y una serie de líneas que a modo de radios nacen de un punto situado entre las dos fuentes, en el experimento de la luz el observador tiene que contemplar el patrón que forma la luz al chocar contra una pantalla.

En este caso, cuando los dos haces formados muy cerca el uno del otro son recibidos por una superficie colocada para interceptarlos, la luz queda dividida por bandas oscuras en porciones casi iguales, pero más anchas cuanto más lejos se sitúe la superficie de los orificios, de manera que subtienden ángulos prácticamente iguales desde los orificios a todas las distancias, y de anchura además proporcional a la distancia que separa a los orificios.⁸³

⁸³ Thomas Young, *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*, Taylor and Walton, Londres, 1845, conferencia 39.

El patrón de interferencia consiste ahora en franjas de luz paralelas. Las franjas claras aparecen allí donde las ondas de la luz se refuerzan y las oscuras, donde las ondas se cancelan.

He leído en algunos libros de divulgación científica que este experimento es fácil de hacer en casa, que basta con disponer de una linterna, una aguja, unas cuantas piezas de cartón y una habitación oscura. No es así. Lo sé porque he perdido una tarde entera intentándolo. Puede conseguirse, pero este experimento exige un trabajo muy atento para que funcione. Es fácil no ver las bandas o ver como mucho sombras producidas por difracción, es decir, por la desviación de la luz en los márgenes del cartón o alrededor de imperfecciones que puede haber en los orificios si éstos no se practican con el máximo cuidado. Es posible hacerlo con papel, cartón y una cuchilla de afeitar, pero la definición de la rendija es tan importante que algunas compañías de suministros científicos para la educación venden cuadrados de plástico con rendijas para usar en este experimento. Hacerlo bien es tan difícil que el historiador Nahum Kipnis logró leer las conferencias de Young con la suficiente atención como para descubrir, más allá de la simple y seductora prosa cuáquera del científico, que al menos en una ocasión incluso él había confundido un patrón de difracción y lo había interpretado como un patrón de interferencia⁸⁴.

Sería bonito poder decir que la demostración de Young marcó un hito en el triunfo de la teoría ondulatoria sobre la corpuscular, que

⁸⁴ Nahum Kipnis, *History of the Principle of Interference of Light*, Birkhäuser, Boston, 1991, p. 124.

convenció a quien tuviera ojos para ver. Pero no fue así por varias razones.

La primera es el estilo de Young. Aunque sus mediciones eran precisas y sus cálculos matemáticos correctos, no se molestaba demasiado en explicar sus razonamientos, en presentar los datos de sus mediciones o siquiera en proporcionar descripciones extensas de sus experimentos. Todo esto contribuyó a que muchos de sus colegas no llegaran a entenderlo, o por lo menos que no llegaran a convencerse. Además, su modestia hacía que a menudo se esforzara por evitar reclamar la originalidad de la teoría ondulatoria de la luz y del concepto de interferencia. En una ocasión, en 1801, haciendo una lectura en exceso benévola de la obra de Newton, llegó a afirmar que su predecesor «fue el primero en sugerir la teoría que intento defender». También esto contribuyó a diluir la apreciación de la originalidad de sus ideas.

Una segunda razón fue que Young tuvo la mala fortuna de convertirse en la diana de Henry Brougham (se pronuncia como «broom»), un influyente corresponsal del *Edinburgh Review*, una nueva revista literaria muy de moda por aquel entonces. Brougham adoraba la figura de Newton y, en un virulento ataque anónimo en tres partes, arremetió contra Young por atreverse a estar en desacuerdo con el maestro. Para muestra, un botón:

Debemos preguntarnos si el mundo de la ciencia que Newton en otro tiempo iluminó no será hoy tan cambiante en sus estilos como el mundo de la moda, que puede alterar un solo gesto de una mujer tonta o de un dandi consentido. ¿Acaso la Real Sociedad ha

degradado sus publicaciones hasta el punto de convertirlas en boletines de teorías de moda y novedades para disfrute de las damas de la Real Institución? Proh pudor! [¡Qué desgracia!]. Dejemos que el profesor siga entreteniendo a su audiencia con su ilimitada variedad de inofensivas fruslerías, pero, en el nombre de la ciencia, no permitamos que entren en ese venerable depósito de las obras de Newton, de Boyle, de Cavendish, de Maskelyne y de Herschel.⁸⁵

Por lo general imperturbable, Young no dejó pasar este ataque y replicó airado del modo como se hacía en el siglo XIX: escribiendo un panfleto. Pero los científicos no están preparados para desenvolverse en este tipo de contiendas públicas, sino para convencer a otros científicos, y la respuesta de Young, escrita en un estilo seco y colérico, fue mucho menos brillante que el ataque. Llena de afirmaciones ciertas pero tediosas que daban la impresión de estar escritas a la defensiva, como «Dejad que haga el experimento y luego niegue el resultado, si es que puede», su réplica vendió exactamente una copia.

Siendo Young tan poco dado a promocionar sus ideas, la teoría ondulatoria de la luz se extendió con gran lentitud hasta que, unos quince años después de la demostración del británico, el científico francés Augustine Fresnel redescubrió el fenómeno de la interferencia tras desarrollar una variante del experimento de la doble rendija en el que el rayo de luz se separa en dos fuentes

⁸⁵ Henry Brougham, «Bakerian Lecture on Light and Colors», *The Edinburgh Review* 1 (1803), pp. 450-456.

mediante un prisma plano, hoy conocido como «biprisma de Fresnel». (Desde entonces, como veremos en el capítulo diez, el experimento de Fresnel se ha realizado según dos variantes clásicas: con el método de la doble rendija de Young y con el biprisma de Fresnel). El entusiasmo del científico francés por este hallazgo hizo que por fin la comunidad científica aceptara la teoría ondulatoria de la luz y que, aunque tardíamente, concediera a Young el crédito que merecía.

El fenómeno de la interferencia no sólo estableció la teoría ondulatoria de la luz, sino que proporcionó, en la forma del patrón de interferencia, simple y fácil de reconocer, una herramienta muy útil para la investigación científica. Si mediante experimentación se logra que un fenómeno exhiba un patrón de interferencia, puede inferirse que ese fenómeno es de naturaleza ondulatoria.

Con todo, para la mayoría de los científicos la teoría ondulatoria todavía planteaba problemas. El más enojoso era la cuestión del medio por el que viajaba la luz. Si las ondas de sonido son ondas de aire y las olas son ondas de agua, en el caso de la luz, ¿cuál es el medio análogo? ¿De qué cosa es onda la luz? La respuesta tradicional a esta pregunta era que ese medio era una sustancia invisible llamada «éter» que supuestamente impregnaba todo el espacio. Así, cuando un ojo humano ve una estrella, estaría respondiendo a una onda en el éter que habría tenido su origen en la estrella y que habría viajado por el espacio como una ola de éter hasta romper en la retina. Más tarde, a finales del siglo XIX, Albert Michelson y Edward Morley demostraron que el patrón de

interferencia producido por rayos de luz que viajen en direcciones distintas respecto del supuesto viento de éter podía utilizarse para medir su velocidad relativa. Sin embargo, no lograron hallar interferencia alguna, y esto se tomó como indicación de que el éter no existía, que de algún modo las ondas de luz no necesitaban viajar por un medio. Su experimento no transformó tanto nuestra concepción de la luz, que siguió siendo la explicación ondulatoria, como el modo en que se entendían las ondas. El experimento de Michelson-Morley pronto se convertiría en un importante apoyo empírico para la teoría de la relatividad de Einstein.

En el siglo XIX, el experimento de las dos rendijas de Young, que extendió la analogía de las olas de la acústica a la luz, anunció un cambio de paradigma de la teoría corpuscular de la luz a la teoría ondulatoria. En el siglo XX habría de producirse una extensión todavía más drástica del experimento de Young, un tercer experimento de la doble rendija, pero no con ondas de agua o de luz, sino con partículas. Esta nueva aplicación de la analogía de las ondas se convertiría en la demostración más simple y espectacular del misterio de la mecánica cuántica. Éste es el último experimento descrito en este libro y, para muchos científicos, el más bello de todos.

Interludio

Ciencia y metáfora

El experimento de Young, cuya belleza radica en la claridad con la que muestra que un fenómeno, la luz, se comporta como otro, las

ondas, es un ejemplo clásico del uso eficaz de la analogía en la ciencia. Pero la analogía («proporción», en griego) y la metáfora (figura retórica que consiste en hablar de una cosa como si fuera otra, de «traslación», en griego) también pueden interferir en un razonamiento y confundirlo. Es por ello que los científicos están divididos sobre su valor⁸⁶.

Algunos piensan que las analogías y las metáforas, en el mejor de los casos, distraen, y en el peor, confunden. «Al pensar sobre la naturaleza», escribió en cierta ocasión el biólogo Richard Lewontin, «hay que tener cuidado con las metáforas». Al físico Ernst Mach le parecía útil poder decir que «el hecho A en consideración se comporta... como el bien conocido hecho B», pero negaba que este tipo de aseveraciones desempeñara un papel estructural en la ciencia. Como Mach, Pierre Duhem, un físico e historiador de la ciencia, veía en las metáforas y las analogías unas herramientas psicológicas, explicativas y educativas importantes, pero insistía en que la auténtica ciencia acaba por desecharlas.

Para los defensores de este punto de vista, quienes usan analogías y metáforas son a la ciencia lo que Aarón era a Moisés. Del mismo modo que este profeta recibía conocimiento del más allá y su hermano y portavoz Aarón, una persona que sabía escuchar y vivía integrado en su comunidad, transmitía ese conocimiento a las masas, los científicos descubren verdades sobre la naturaleza que los educadores, los divulgadores y los periodistas interpretan para

⁸⁶ Esta sección se basa en una columna de *Physics World* («Physics, Metaphorically Speaking», noviembre de 2002, p. 17) que, a su vez, se basa en parte en el capítulo tres de mi libro *The Play of Nature: Experimentation as Performance*.

legos y principiantes con la ayuda de imágenes y lenguaje corriente. Quienes se oponen al uso de las metáforas y las analogías en la ciencia les conceden a éstos un papel secundario en la divulgación y transmisión de la información, pero ningún papel en el proceso principal de descubrimiento. La ciencia, la verdadera ciencia, versa sobre lo que son las cosas, no sobre lo que parecen.

Hay también, empero, quienes creen que las analogías y las metáforas están tan profundamente arraigadas en el pensamiento científico que son prácticamente indispensables. «Probablemente no sea exagerado afirmar», afirma el físico Jeremy Bernstein, «que toda la física teórica progresa mediante analogías». Y el físico John Ziman dice que «no podemos pensar sobre nada si no es con la ayuda de metáforas y analogías». Los defensores de este punto de vista sostienen que siempre que los científicos dicen qué es algo, dicen también a qué se parece y qué se parece a ello.

Este tipo de conflicto, en el que los ejércitos enfrentados se agrupan a lado y lado de una frontera en apariencia clara e intratable, puede ser resuelto con la ayuda de la filosofía, cuyo papel es precisamente el de detectar y poner de manifiesto las confusiones y ambigüedades que hacen que esas fronteras parezcan intratables. En el caso de las metáforas en la ciencia, un filósofo señalaría de manera instintiva que no todas las metáforas funcionan del mismo modo o por las mismas razones. De hecho, las metáforas de la ciencia funcionan al menos de tres modos distintos.

Un primer uso de la metáfora es a modo de filtro. Consideremos las metáforas clásicas como «el hombre es un lobo» o «el amor es una

rosa». En éstas, lo que se conoce como «sujeto secundario» (el lobo, la rosa) llama la atención del lector hacia ciertos rasgos que por convención se tiende a asociar con estos objetos (solitario y depredador en el caso del lobo; bella pero espinosa en el caso de la rosa). En ambos casos el objetivo consiste en poner de manifiesto aquellos aspectos del «sujeto primario» (el hombre, el amor) y filtrar, dejar afuera, por así decirlo, todo lo demás. Las metáforas que actúan como filtros permiten un primer contacto con el sujeto primario. Pero como por todos los filtros se cuelan cosas, cuando se interpretan de forma literal pueden resultar engañosos. Así, el enfado de Lewontin se desencadenó a raíz de que un colega hiciera referencia al ADN como un «programa» sobre cuya base, según afirmaba, se podía «computar» un organismo. Un organismo, como bien le corrigió, no es una «computadora». Pero la cuestión no era si esa metáfora de filtro era completamente cierta en todos y cada uno de sus sentidos, sino más bien si podía proporcionarnos un destello rápido de comprensión intuitiva de algún aspecto del sujeto. El objetivo es avanzar; el peligro, quedarse atascado por tomar una metáfora al pie de la letra.

Un segundo uso de las metáforas es el creativo. En este caso la prioridad de los dos términos se invierte, pues el sujeto secundario se utiliza para traer a colación un conjunto de ecuaciones ya organizado y aplicarlo al objeto primario, donde eventualmente se desarrolla un término importante y técnicamente correcto que en el proceso amplía su significado hasta el punto de que el sujeto primario se convierte simplemente en una de sus formas derivadas.

Cuando Young y otros comenzaron a hablar de la luz (el sujeto primario) como una onda (el sujeto secundario), construyeron una analogía de este tipo. Las ondas hacían referencia, en principio, a un estado de perturbación que se propagaba de un conjunto de partículas a otro en un medio, como en el caso de las olas o de las ondas de sonido. Cuando Young y otros comenzaron a hablar de la luz como una onda, supusieron que también se propagaba por un medio, al que por defecto llamaron «éter» y sobre el cual no sabían nada. A finales del siglo XIX los científicos comenzaron a pensar que la luz se propagaba en ausencia de un medio, pero seguían describiéndola con las mismas ecuaciones y era igualmente correcto describirla como una onda. «Onda» se había convertido en un término técnicamente correcto que se había transformado en el camino, puesto que la idea que tenían los científicos del concepto «onda» había cambiado en el momento en que lo aplicaron a una perturbación que se propagaba sin un medio (y todavía cambió más cuando las ondas aparecieron en la mecánica cuántica). Éste es el tipo de extensión por analogía que Bernstein consideraba un proceso básico en la física teórica: intentar comprender aquello que no nos resulta familiar comparándolo con cosas que conocemos y adaptando en el proceso nuestras descripciones de lo conocido. A menudo descubrimos qué es una cosa cuando descubrimos a qué se parece. Entonces los significados de nuestros términos antiguos cambian, pasan a «parecerse» a los nuevos. «Lo literal», insistía en decirme cierto historiador, «es tan sólo una metáfora de la metáfora». O, parafraseando un antiguo dicho, «quien hace

analogías, inventa». Es lo que el filósofo Eugene Gendlin llama *just-as-ing* (forma verbal del inglés *just as*, «igual que»), un proceso activo por el que emerge algo nuevo de la transformación de lo viejo a diferencia de un proceso por el cual se impone algo viejo sobre algo nuevo.

Otro ejemplo de este uso creativo de la analogía en la ciencia concierne al uso del concepto de energía. Al principio fue importante la experiencia subjetiva que de sí mismos tienen los individuos como centro de la acción⁸⁷. En su octava conferencia para la Real Institución, «Sobre las colisiones», Young dijo que «el término “energía” puede aplicarse, con gran propiedad, al producto de la masa o el peso de un cuerpo por el cuadrado del número que expresa su velocidad», una expresión que hoy escribiríamos mv^2 . Young se convertía así en la primera persona en utilizar la palabra «energía» con su significado físico actual. No obstante, la «energía» de Young tampoco era, en sentido estricto, la nuestra, sino lo que hoy llamamos «energía cinética»; y ni siquiera su formulación era la actual (decimos que es igual a $\frac{1}{2} mv^2$, no a mv^2). Esta evolución proseguiría durante el resto del siglo.

⁸⁷ El historiador de la ciencia Stanley Jackson ha mostrado que Johannes Kepler, como muchos científicos de finales del siglo XVI y principios del XVII, proyectó en su mecánica una versión secular de una fuerza animista afín al alma. «Si sustituimos la palabra “alma” por la palabra “fuerza”, obtenemos justamente el principio que subyace a mi física de los cielos», escribió Kepler en 1621. Aunque entonces rechazaba la idea de que esa fuerza fuese espiritual, añadió que había llegado «a la conclusión de que esta fuerza debe ser algo sustancial, “sustancial” no en un sentido literal sino... del mismo modo que podríamos decir que la luz es algo sustancial, queriendo con ello significar que es una entidad insustancial que emana de un cuerpo sustancial».

Un tercer uso de la metáfora es la refundación de nuestra concepción global de algo⁸⁸. Un ejemplo sería el conocido comentario del médico Lewis Thomas de que la Tierra no es como un organismo, sino «más bien como una sola célula». Otro ejemplo de una metáfora de refundación es el experimento mental propuesto por Stephen Jay Gould de «volver a visionar el vídeo de la vida», con el que pretendía reeducar nuestra percepción de la evolución como una escalera de progreso o un cono de creciente diversidad a favor de una apreciación de su contingencia. «Aprietas el botón de rebobinado y, tras asegurarte de que se ha borrado por completo todo lo que realmente ha ocurrido, vuelves a algún tiempo y lugar del pasado... dejas que la cinta corra de nuevo, y miras si la repetición se parece en algo al original⁸⁹».

Estos tres modos de utilizar las metáforas en la ciencia no son rígidos e inseparables, sino que a veces se mezclan entre sí. Con todo, reconocerlos ayuda a entender por qué los científicos pueden tropezar en su apreciación de las metáforas y decir de ellas cosas distintas y en apariencia contradictorias.

Clarificar la naturaleza de los usos metafóricos es importante para entender la ciencia y su belleza. Una de las razones de ello es que los sujetos secundarios están arraigados en la cultura y la historia. Los científicos siempre trabajan con conceptos y prácticas

⁸⁸ Son lo que el filósofo Bruce Wilshire denomina «metáforas fisiognómicas».

⁸⁹ Por último, algunos términos científicos parecen metáforas pero no lo son. Son ejemplos los nombres de los *quarks* «encanto», «extraño», «belleza» y «verdad». Sería tonto pensar en ellos como metáforas. Este tipo de nombres no nos dicen nada y de ningún modo intentan llegar a lo que es algo. Son sólo una manera de ser irreverente.

transmitidos por estas fuentes, y no los trascienden sino que los transforman⁹⁰.

Las metáforas y las analogías son instrumentos precisos que ayudan a los seres humanos a aplicar todo lo que han heredado y desarrollado en su esfuerzo por proyectarse a sí mismos hacia el futuro. La experiencia y la formación nos llenan la mente de metáforas que no podemos dejar de aplicar a lo nuevo, transformando de paso lo que conocemos. Es por ello que puede ser igualmente cierto que no podemos pensar sin metáforas, como dice Ziman, y que «todas las metáforas se agotan», como afirma Peter Galison en su libro *Image and Logic* (1997), que explora las analogías de la mal comprendida relación entre teoría, experimentación e instrumentación.

El usuario de metáforas, por tanto, no puede concebirse como un Aarón que escucha y transmite lo que recibe de Moisés, el profeta y

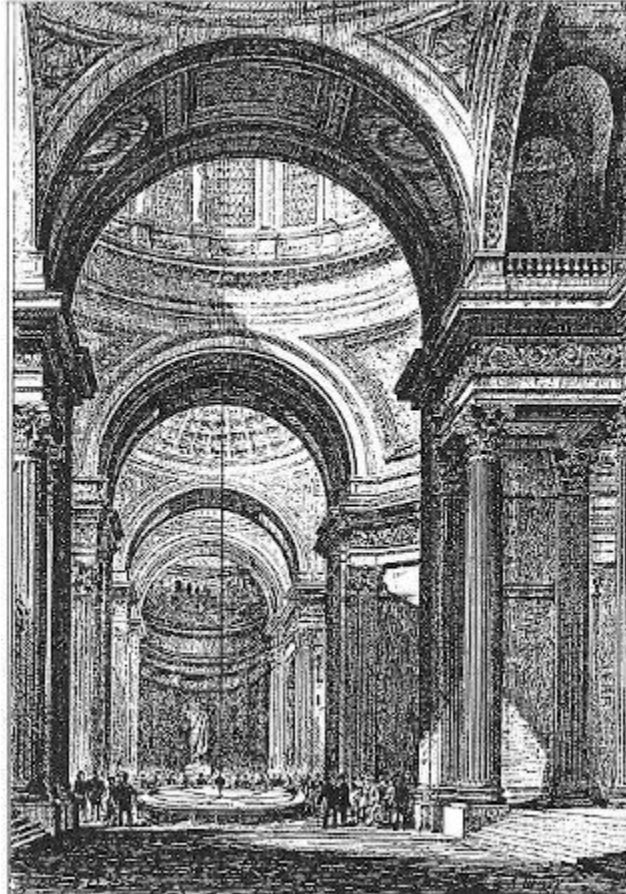
⁹⁰ Una buena ilustración de por qué es importante entender este proceso son las recientes «guerras de la ciencia» que en buena medida han girado en torno a si las metáforas que uno encuentra en la ciencia son creativas (lo que implicaría que el conocimiento generado está vinculado a la cultura y la historia) o filtrativas (y por tanto desechables). Un ejemplo de ello es el debate sobre la relatividad entre el sociólogo Bruno Latour, profesor del Centre de Sociologie de l'Innovation de la École Nationale Supérieure des Mines de París, y John Huth. Latour, tras examinar un libro en el que Einstein se basaba en imágenes de observadores y varas de medir para explicar la relatividad, argumentaba que eso era señal de que la teoría estaba socialmente construida. Huth replicó que el libro en cuestión era de divulgación, señaló que las imágenes no eran esenciales para la teoría que Einstein pretendía explicar y rechazó el método de Latour acusándolo de «difamador de metáforas». (John Huth, «Latour's Relativity», *A House Built on Sand*, N. Koertge (ed.), Oxford University Press, Nueva York, 1998, pp. 181-192). Que la metáfora podría desempeñar un papel más profundo lo sugiere Peter Galison, un historiador de la Universidad de Harvard, quien ha señalado la importancia para el pensamiento de Einstein de los métodos de sincronización de relojes en la Europa de finales del siglo XIX y principios del XX para coordinar los trenes. No sólo estaba familiarizado Einstein con la teoría por ser funcionario de patentes, argumenta Galison, sino que, por extensión metafórica, le ayudó a ver la solución al problema de la simultaneidad dada la velocidad finita de la luz. Según Galison, la idea crucial de Einstein se produjo cuando comprendió que no era requisito indispensable que hubiera un «reloj maestro»

descubridor. O bien, si es que uno insiste en expresarlo de ese modo, debe reconocerse que la diferencia entre profetizar y escuchar, entre descubrimiento primario y transmisión secundaria, y entre decir lo que algo es y a qué se parece, se desmorona. Todo acto de investigación ya es un pensamiento metafórico. Y es que Moisés, podríamos decir, jugaba el papel de Aarón para Dios.

Capítulo 7

Ver cómo gira la tierra

El sublime péndulo de Foucault



El péndulo de Foucault en el Panteón.

La primera vez que vi un péndulo de Foucault fue en el Instituto Franklin, en mi ciudad natal, Filadelfia. Pendía —y todavía pende— del hueco de una de las escaleras principales. Su fino cable de metal estaba sujeto al techo, cuatro pisos más arriba, y en el otro extremo una esfera plateada se balanceaba suavemente de un lado a otro sobre un disco con la rosa de los vientos incrustado en el suelo (en el que recientemente se ha insertado un globo del mundo).

Todavía recuerdo la información que contenía el rótulo del primer piso: el cable del péndulo medía 26 metros y la pesa, una esfera de acero de unos sesenta centímetros de diámetro cargada de perdigones de plomo, pesaba cerca de 820 kilogramos. La esfera oscilaba en una línea recta, silenciosa y pesadamente, una vez cada diez segundos. El plano de oscilación se iba moviendo lentamente hacia la izquierda (en el sentido de las agujas del reloj) durante todo el día a una velocidad constante de 9,6 grados por hora. El rótulo me informaba también de que si bien el péndulo parecía cambiar de dirección, no era así: siempre oscilaba siguiendo exactamente la misma dirección con respecto a las estrellas. Lo que el visitante del museo veía realmente era cómo la Tierra, y con ella el suelo del Instituto y la rosa de los vientos del suelo, giraban bajo el péndulo. Éste había sido instalado en 1934, cuando el Instituto se trasladó al edificio que ocupa en la actualidad. Su instalación fue motivo de un insólito desfile. El cable, que pesaba sólo 4 kilogramos, no podía enrollarse sino que debía mantenerse recto en todo momento a fin de impedir que se enroscara y se formaran en él tensiones que pudieran interferir en su oscilación. Por ello, fue transportado totalmente estirado por las calles de Filadelfia desde el lugar de su fabricación hasta el nuevo edificio. La lenta y extraña procesión de once hombres que portaban el largo cable iba acompañada de una escolta policial y seguida por periodistas y desconcertados espectadores⁹¹.

⁹¹ «The Foucault Pendulum» (anónimo), *The Institute News*, abril de 1938.

El péndulo del Instituto Franklin señalaba sus cambios de dirección tumbando, cada 20 minutos, aproximadamente, uno de los pivotes de acero de 10 centímetros colocados sobre el suelo formando dos semicírculos en los límites de la rosa de los vientos. Cuando visitaba el Instituto, a menudo abandonaba la exposición con la que estuviera jugando para correr a unirme a la muchedumbre que miraba el balanceo de la esfera plateada y vigilaba los pivotes con la esperanza de ver cómo caía uno de ellos. Todo comenzaba cuando la esfera rozaba uno de los pivotes, haciéndolo estremecer. Unas pocas oscilaciones más tarde, el pivote comenzaba a temblar claramente. Unas pocas más y el indicador de la esfera golpearía el pivote con la fuerza suficiente como para sacudirlo. ¡Ya faltaba poco! Una o dos oscilaciones más y el pivote caería, ¡plinc!, y la esfera continuaría su lenta aproximación al siguiente. A veces me quedaba mirando al propio péndulo, intentando obedecer el cartel explicativo y forzándome a ver que era yo, y el suelo a mis pies, quien se movía. Por razones que no entendía, nunca lo lograba, pero el péndulo siempre me dejaba con un sentimiento de misterio y asombro.

El movimiento del péndulo, ensimismado en su actuación, quedaba totalmente fuera de mi control. La única influencia humana a la que estaba sometido era el ritual diario que seguían los encargados de la exhibición, que cada mañana iniciaban su oscilación, en la dirección norte-sur, justo antes de que el museo abriera sus puertas a las diez de la mañana. A veces me acercaba al museo temprano, esperaba a que abriera sus puertas y corría hasta el hueco de la escalera para ver cómo daban el primer impulso al péndulo.

Siempre llegué tarde. En una ocasión oí que uno de los patrocinadores del museo había organizado, como regalo de cumpleaños para su hijo, que éste pudiera dar el primer impulso al péndulo. ¡Cómo envidié a ese niño! Otros, de pequeños, habrán soñado con hacer el primer lanzamiento de un partido de béisbol. Yo soñaba con poner en marcha el péndulo de Foucault.

El científico francés Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868) nació en París. De joven se dedicaba a construir juguetes mecánicos y científicos, y comenzó a estudiar medicina con la intención de sacarle partido a su talento práctico convirtiéndose en un cirujano, pero pronto descubrió su aversión a la sangre y al sufrimiento. Otra vez interesado en los instrumentos y los inventos mecánicos, se sintió atraído por los nuevos procesos de fotografía desarrollados por su compatriota Louis Daguerre. En un empeño que explotaba con éxito sus habilidades mecánicas, Foucault se asoció con otro antiguo estudiante de medicina, Hippolyte Fizeau, para mejorar los llamados daguerrotipos, unos predecesores de la moderna fotografía. Entre los dos sacaron la primera imagen definida del Sol en 1845, y más tarde, primero trabajando juntos y luego por separado tras una disputa personal, demostraron en 1850 que la velocidad de la luz era mayor en el aire que en el agua y se propusieron después medir la velocidad absoluta de la luz en el aire. Más tarde, Foucault realizó también contribuciones importantes a la construcción de espejos para telescopios.

Foucault fue también uno de los primeros en sacar fotografías de las estrellas, una auténtica hazaña técnica en su tiempo. Por lo

general, para fotografiar objetos poco luminosos se deja abierto el obturador de la cámara durante varios minutos, pero como la Tierra rota alrededor de su eje, las estrellas en apariencia se mueven lentamente por el cielo, de modo que no basta con dejar el obturador abierto. Recuperando una idea antiguamente descartada, Foucault construyó un dispositivo de relojería impulsado por un péndulo que mantenía la cámara apuntando hacia la estrella durante el tiempo necesario para una exposición, sólo que en lugar de una pesa colgada de un hilo utilizó una varilla de metal que vibraba como un péndulo cuando se tañía. (He leído docenas de artículos sobre péndulos y hablado con muchos científicos sobre ellos, y puedo asegurar que el término técnico para poner en marcha un péndulo de varilla metálica es «tañer»).

La mayor parte de este trabajo la realizó en un laboratorio que había instalado en su casa de la calle Assas de París. Un día puso una varilla en su torno y la montó sobre una pieza que podía girar libremente, del mismo modo que la rueda de un monopatín puede girar libremente en su montura. Cuando golpeó la varilla y giró lentamente el torno vio que, para su sorpresa, la varilla seguía oscilando en el mismo plano. Siempre curioso, Foucault comenzó a experimentar con un péndulo más convencional, una pesa esférica suspendida verticalmente con una cuerda de piano de tal modo que pudiera oscilar libremente. La sujetó al cabezal de un taladro de columna y giró el portabrocas. El péndulo seguía oscilando en el mismo plano.

Si uno se para a pensarlo, no hay de qué sorprenderse. De acuerdo con las leyes de Newton, un cuerpo con movimiento libre, como la pesa de un péndulo, se mueve en la misma dirección siempre que no se aplique una fuerza que la modifique. Como al girar la pieza de rotación libre no se aplicaba ninguna fuerza sobre la varilla o el péndulo, éstos seguían oscilando en la misma dirección. Pero una cosa puede no ser sorprendente y sin embargo resultar inesperada. Foucault pronto se dio cuenta de que, si se magnificaba lo suficiente, este efecto se podía utilizar para demostrar la rotación diaria de la Tierra alrededor de su eje.

Más adelante resumiría su razonamiento de forma bastante elegante de la siguiente manera. Imaginemos que construimos un pequeño péndulo sobre una tabla que colocamos sobre una plataforma que pueda girar libre y suavemente (como las bandejas giratorias de las cocinas). Tenemos así lo que Foucault llamaba un *petit théâtre* sobre el que vamos a representar una obra. La bandeja giratoria es la Tierra y la habitación en la que nos encontramos es el resto del universo. Si ponemos el péndulo en movimiento en un plano (por ejemplo, apuntando a la puerta) y luego giramos lentamente la bandeja, ¿qué ocurrirá? De entrada podríamos esperar que el plano de oscilación del péndulo girara al girar la base. *Erreur profonde!* El plano de oscilación no es una cosa material unida a la base. A causa de la inercia del péndulo, su plano de oscilación será independiente de la bandeja. Por decirlo de algún modo, no pertenece a la bandeja, sino al espacio que los rodea, a la

habitación. No importa en qué dirección giremos la bandeja, el péndulo siempre apuntará a la puerta.

En esta representación en el pequeño teatro resulta evidente que la bandeja giratoria se mueve mientras que el plano de oscilación del péndulo permanece inalterado. Pero, continúa Foucault, imaginemos que agrandamos muchísimo nuestro pequeño teatro. Imaginemos que nosotros y el resto de la habitación y todo lo que vemos a nuestro alrededor a excepción del Sol, los planetas y las estrellas, estuviéramos en la bandeja giratoria. Entonces nos parecería que nosotros estamos quietos mientras que la dirección en que oscila el péndulo cambia. Una vez más, *erreur profonde!* Somos nosotros quienes giramos. Pero Foucault señala una complicación adicional. Nuestro pequeño péndulo está en el centro de una plataforma plana, de modo que un giro completo de la base haría que el plano de oscilación del péndulo girara en apariencia 360° , es decir, un círculo completo. Pero un péndulo colocado sobre la Tierra se encuentra en la superficie de una esfera. Dependiendo de dónde se encuentre el péndulo entre el polo y el ecuador, una rotación completa de la esfera hará que el plano del péndulo gire en distinto grado, y por tanto la esfera habrá de rotar más o menos para que el plano de oscilación del péndulo complete un círculo. Tras hacer los cálculos matemáticos pertinentes, el científico francés concluyó que el número de grados que girará el plano de oscilación del péndulo durante un período de veinticuatro horas será de 360° multiplicado por el seno de la latitud, proporcionando de este modo una forma de estimar la posición de una persona en el globo terráqueo respecto a

los polos. Los detalles de los cálculos no son tan importantes como la demostración visible de los efectos de la rotación de la Tierra.

Foucault se preguntó si podría observar el efecto de la rotación de la Tierra con un péndulo real. Para comprobarlo, suspendió un péndulo de la bóveda del sótano de su casa con un fino cable de 2 metros de longitud y una pesa de 5 kilos. El viernes 3 de enero de 1851 hizo la primera prueba. Para asegurarse de que el balanceo del péndulo fuera regular y recto, ató la pesa a la pared con una cuerda de algodón, esperó a que estuviera totalmente quieta y entonces quemó el cable en toda su longitud con una vela. Aunque el experimento parecía estar funcionando, el cable se partió. Cinco días más tarde, el miércoles 8 de enero de 1851, a las dos de la madrugada logró ponerlo en marcha de nuevo, y al cabo de media hora ya había descubierto que «el desplazamiento resultaba evidente a simple vista», y que «el péndulo giraba en la dirección del movimiento diario de la esfera celeste⁹²». Siempre metódico, le pareció menos importante observar el fenómeno a una escala mayor y «más interesante seguir el fenómeno de cerca, hasta quedar satisfecho de la continuidad del efecto⁹³». Montó un indicador sobre el suelo de manera que rozara apenas al péndulo y observó que, en menos de un minuto, éste se había desplazado hacia la izquierda del observador, lo que significaba que el plano de oscilación del péndulo se movía en el mismo sentido que el movimiento aparente de la bóveda celeste.

⁹² Citado en Stephane Deligeorges, *Foucault et ses pendules*, Éditions Carre, París, 1990, p. 48.

⁹³ M. L. Foucault, «Physical Demonstration of the Rotation of the Earth by Means of the Pendulum», *Journal of the Franklin Institute*, mayo de 1851, pp. 350-353.

Unas cuantas semanas más tarde, Foucault escribió:

El fenómeno se desarrolla con calma; es inevitable, irresistible... Viéndolo nacer y crecer, nos damos cuenta de que no está en la mano del observador acelerarlo o frenarlo... Todo el mundo, en su presencia... se queda pensativo y callado durante unos instantes y por lo general se va con una sensación más apremiante e intensa de nuestra incesante movilidad en el espacio⁹⁴.

Al poco tiempo, el director del Observatorio de París le pidió que repitiera el experimento en la *salle méridienne*, la sala central, situada en el meridiano. Foucault utilizó la misma pesa pero alargó el cable hasta los 11 metros. Esto era preferible porque un péndulo con un cable más largo se balancea durante más tiempo al estar menos afectado por la fricción en el aire y en la montura que sujeta el cable al techo. Esto magnifica la oportunidad de ver su cambio de dirección aparente.

El 3 de febrero de 1851, exactamente un mes después de comenzar su experimento, Foucault presentó oficialmente los resultados de su trabajo a la Academia de Ciencias Francesa. La Academia envió unas ostentosas invitaciones: «*Vous êtes invités à venir voir tourner la Terre, dans la salle méridienne de l'Observatoire de Paris*», «Está usted invitado a venir a ver cómo gira la Tierra, en la sala central del Observatorio de París». En la reunión, Foucault explicó a su

⁹⁴ M. L. Foucault, «Démonstration expérimentale du mouvement de rotation de la Terre», *Journal des Debats*, 31 de marzo de 1851. Para saber más sobre Foucault, véase Amir Aczel, *Pendulum: Léon Foucault and the Triumph of Science*, Pocket Books, Nueva York, 2003; William John Tobin, *The Life and Science of Léon Foucault, the Man Who Proved the Earth Rotates*, Cambridge University Press, Londres, 2003.

público que la mayoría de los científicos que estudiaban los péndulos se centraban en el tiempo de oscilación. Su propio trabajo, en cambio, se había centrado en el *plano* de oscilación. Luego, mientras el péndulo se balanceaba, pidió a la audiencia que realizara una versión del experimento mental antes descrito, que imaginaran que construían un péndulo «de la mayor simplicidad» en el Polo Norte, ponían en marcha la pesa y lo dejaban «abandonado a la acción de la gravedad». Como la Tierra «no cesa de girar de oeste a este», el plano de oscilación parecería desviarse hacia la izquierda, desde la perspectiva del observador, como si la oscilación estuviera sujeta a la propia bóveda celeste.

Pocos experimentos científicos consiguen la fama instantánea de que gozó el péndulo de Foucault. Aunque en 1851 todos los europeos cultivados sabían que la Tierra se movía, toda la evidencia que demostraba este hecho, por incontrovertida que fuera, se basaba únicamente en inferencias realizadas a partir de observaciones astronómicas. Las personas que no tuvieran acceso a un telescopio y carecieran del conocimiento necesario para usarlo no tenían manera de ver ese movimiento con sus propios ojos. Con el péndulo de Foucault, la rotación de la Tierra parece hacerse visible. Cualquier persona con la formación adecuada encerrada en una habitación sin ventanas podía probar que ésta giraba y, tras realizar unas mediciones cuidadosas, incluso determinar la latitud a

la que se encontrara la habitación⁹⁵. El péndulo, como gustaba de decir Foucault, hablaba «directamente a los ojos».

¿O acaso no? Una de las fascinaciones que suscita el péndulo de Foucault es que pone de manifiesto las ambigüedades de la percepción. El comentario del parisino es filosóficamente falso: nada habla directamente a los ojos. El comentario es cartesiano; Foucault imagina que sus ojos son ojos geométricos y se ha convencido a sí mismo de que puede ver lo que él imagina ideal y geoméricamente. Si podemos imaginar la posición del péndulo oscilando contra el fondo del sistema solar como modelo geométrico, piensa, podemos «ver» cómo gira la Tierra. Pero la percepción es algo más complejo. Percibir qué se mueve y qué está quieto depende de qué tomemos como primer plano y qué como segundo plano u horizonte. El péndulo de Foucault parece ofrecernos la experiencia o bien de que el péndulo gira en el campo gravitatorio de la Tierra, o bien de que la Tierra gira a nuestros pies. Esta disyuntiva se asemeja a la descripción que nos ofrece el filósofo francés Maurice Merleau-Ponty de la familiar experiencia de estar dentro de un tren parado en una estación junto a otro tren en una vía cercana. Cuando el otro tren comienza a moverse, experimentamos o bien que empezamos a movernos, o que el otro tren comienza a moverse en la dirección contraria. Cuál de las dos percepciones se produce dependería, escribe Merleau-Ponty, de dónde centremos nuestra atención en ese momento (en este tren o en el otro), y de cuál es el segundo plano u

⁹⁵ Demostrar el movimiento de traslación de la Tierra —su movimiento por el espacio a diferencia de su movimiento de rotación sobre su eje— sería más difícil.

horizonte exterior⁹⁶. Para poder ver moverse el plano de oscilación del péndulo, basta con que hagamos lo que la percepción suele hacer: que tomemos el objeto en cuestión (el péndulo) como primer plano y el resto de la habitación como segundo plano. Como todo instrumento, el péndulo de Foucault nos muestra lo que hace sólo en el entorno apropiado. Para «ver» cómo gira la Tierra tendríamos que introducir un segundo plano distinto y mucho mayor para que la propia Tierra nos manifestara su movimiento y el plano de oscilación del péndulo se revelara estático. ¿Y si en lugar de instalar el péndulo en el interior de un edificio lo instalásemos en el exterior? ¿Podríamos ver cómo gira la Tierra en una noche estrellada?

A medida que las noticias sobre la demostración inundaron París, Foucault comenzó a recibir montañas de correspondencia de ciudadanos corrientes, de otros científicos e incluso de funcionarios del gobierno interesados. El príncipe Luis Napoleón Bonaparte, el presidente de la República que pronto habría de convertirse en Napoleón III, emperador de Francia, le solicitó que preparara una demostración pública en el Panteón de París, una antigua iglesia que se había convertido en la última morada de muchos de los héroes nacionales franceses. El panteón era, según escribió Foucault, un lugar maravillosamente apropiado para el

⁹⁶ M. Merleau-Ponty, *Phenomenology of Perception*, tr. C. Smith, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1962, p. 280. (Hay trad. cast.: *Fenomenología de la percepción*, Edicions 62, Barcelona, 1980; y Planeta-De Agostini, Barcelona, 1985). Quiero expresar mi agradecimiento a Patrick Heelan por algunos de los pensamientos que siguen, y a Bob Street, que se preguntó qué pasaría si se introdujera una persona en una bola de péndulo del tamaño adecuado o si se instalara un péndulo en un restaurante giratorio cuyo período fuera un día sideral, y se viera contra una noche estrellada de fondo.

experimento, que a partir de entonces quedaría revestido de un *splendeur magnifique*⁹⁷. Cuanto más largo fuera el péndulo, más lenta y majestuosamente se movería y demostraría con mayor eficacia si cabe el movimiento de su entorno. En este magnífico escenario, Foucault colgó un péndulo del centro de la enorme cúpula del Panteón. Estaba formado por un cable de 67 metros de largo y una bala de cañón a cuya parte inferior se había añadido una pequeña aguja indicadora. A lo largo de la circunferencia dentro de la cual oscilaría el péndulo, Foucault y sus ayudantes construyeron dos taludes de arena formando sendas semicircunferencias que el péndulo hendiría con su aguja en cada extremo de su balanceo, marcando de este modo su posición. Por si acaso se rompía el cable y caía la bala, Foucault protegió el mosaico del suelo de Panteón bajo la cúpula cubriéndolo con una plancha de madera y con varios centímetros de arena bien prensada. No fue mala idea, puesto que la primera vez que se instaló el péndulo, el cable se partió justo debajo de la cúpula y Foucault y sus ayudantes vieron aterrorizados cómo el cable, convulsionado por la energía del péndulo, latigueaba de un lado a otro de la sala a lo largo de sus más de sesenta metros de caída. Al volver a asegurarlo, le montaron un paracaídas a la altura de la cúpula por si acaso el cable volvía a romperse por el extremo superior.

El 26 de marzo, uno de los ayudantes de Foucault ató la pesa a una pared por medio de una cuerda y esperó a que quedara totalmente inmóvil. Esta vez, quemaron el cable con una cerilla en lugar de una

⁹⁷ Deligeorges, *Foucault*, p. 60.

vela (las cerillas de seguridad se habían inventado ese año). El péndulo se movió con pesadez, magnificencia y melancolía cruzando 6 metros de suelo con cada balanceo y realizando una oscilación completa de ida y vuelta cada 16 segundos. Su fino cable, de menos de un milímetro y medio de diámetro, era prácticamente invisible en aquel imponente marco, de manera que la resplandeciente pesa daba la impresión de estar suspendida en el vacío. Cada vez que la pesa alcanzaba los taludes de arena al final de cada balanceo, la aguja cortaba un fino surco en la arena mojada, y cada marca consecutiva se realizaba a unos dos milímetros a la izquierda de la anterior. A la latitud de París (aproximadamente 49° N), el péndulo se movía más o menos un grado cada 5 minutos, algo más de once grados en una hora, con lo que habría de completar un círculo completo en unas treinta y dos horas, siempre y cuando no se frenara antes.

La demostración realizada en el Panteón no fue perfecta; el surco cortado por la aguja pasó a dibujar poco a poco una finísima figura en ocho, obviamente a causa de imperfecciones del cable o de su soporte. Además, la distancia cubierta por la pesa en cada oscilación se fue acortando de forma gradual a causa de la resistencia del aire, aunque el tiempo transcurrido en cada oscilación permaneciera inalterado (el principio de isocronía que había descubierto Galileo, válido para todos los péndulos con amplitud pequeña).

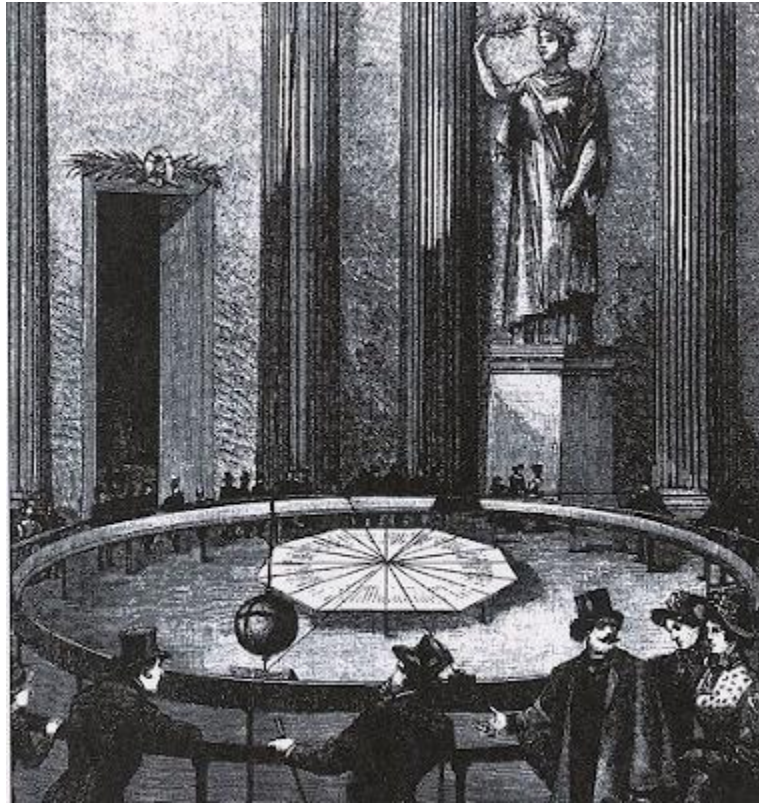


Figura 7.1. El péndulo de Foucault en el Panteón. Pueden verse los taludes de arena que sirven para marcar la posición del péndulo al final de cada oscilación.

Aun así, el péndulo siguió poniendo de manifiesto el cambio de dirección durante unas cinco o seis horas, tras lo cual la dirección del balanceo había girado a la izquierda en el sentido de las agujas del reloj (en el hemisferio sur, se desplazaría en el sentido contrario) una distancia de unos sesenta a ochenta grados. Encantado, Luis Napoleón recompensó a Foucault nombrándolo para una codiciada posición como físico del Observatorio, lo que le permitió trasladarse por fin de su laboratorio del sótano.

El año 1851 fue un año de maravillas. Se inauguró la exposición del Palacio de Cristal en Londres y, con ella, toda una nueva época para

la exposición, la visibilidad y la gestión del tiempo y el espacio. Fue la primera exposición, por ejemplo, en la que se marcaron con la fecha los billetes de entrada para gestionar las visitas. De hecho, muchos historiadores sitúan en esta exposición el nacimiento de la moderna sociedad de masas.

El año 1851 fue también el año del péndulo de Foucault. Proliferaron por todo el mundo: Oxford, Dublín, Nueva York, Río de Janeiro, Ceilán, Roma. Las catedrales, con sus altos techos y su aire de estabilidad y solemnidad, eran los lugares perfectos para instalarlos. En mayo de 1851 se instaló uno en la catedral de Nôtre Dame de Reims (40 metros de cable, una pesa de 19,8 kilogramos y más de un milímetro de desviación en cada oscilación), una de las catedrales góticas más bellas de Francia y lugar de coronación de reyes. En junio de 1868 se instaló un péndulo de Foucault en la catedral de Nôtre Dame de Amiens, otra obra maestra de la arquitectura gótica. Y si bien la planificación de la exposición del Palacio de Cristal estaba demasiado avanzada para exhibir un péndulo de Foucault, hubo uno en la Exposición de París de 1855. Para este acontecimiento, Foucault inventó un ingenioso dispositivo que daba un ligero empujón electromagnético a la pesa en cada oscilación para evitar que se frenara. Ese mismo año, su péndulo original se instaló en el Musée des Arts et Métiers de París, una institución fundada para servir de «depósito de invenciones nuevas y útiles», donde todavía puede verse.

Pero el péndulo de Foucault fue algo más que una simple demostración pública, por interesante que fuera. Como todo

descubrimiento científico, su impacto alcanzó tanto al pasado como al futuro. El estudio minucioso de los escritos de científicos del pasado reveló que otros ya habían notado que la dirección del péndulo se desviaba lentamente hacia la izquierda, entre ellos Viviani, el devoto discípulo de Galileo y el primero en estudiar los péndulos con rigor. No obstante, Foucault había sido el primero en vincular esta deriva hacia la izquierda con la rotación de la Tierra. Por otro lado, Foucault señaló que la idea básica de su trabajo ya la había anticipado el matemático y físico Siméon-Denis Baron Poisson (1781-1840). Éste había calculado que una bala de cañón disparada hacia el aire sufriría una ligera desviación aparente hacia un lado a causa de la rotación de la Tierra durante su vuelo, aunque había considerado que esa desviación era demasiado pequeña para poder observarse. Poisson también había comprendido que la rotación de la Tierra debía afectar a los péndulos, pero no había llegado a darse cuenta de que la minúscula variación de cada movimiento de la pesa se incrementaría con cada oscilación, lo que permitía que el movimiento, en palabras de Foucault, fuera acumulando los efectos hasta permitirles «pasar del dominio de la teoría al de la observación». Más tarde, al aumentar el alcance de los cañones, se hizo necesario que los artilleros corrigieran el efecto descrito por Poisson. El físico H. R. Crane observa que,

Durante la batalla naval de las islas Falkland al principio de la primera guerra mundial, los artilleros británicos se extrañaron que sus salvas cayeran siempre a la izquierda de las naves alemanas. [Para corregir el tiro] habían seguido las tablas elaboradas de

*acuerdo con la fórmula de Poisson, pero habían olvidado cambiar el signo de las correcciones para que fueran válidas en el hemisferio sur*⁹⁸.

Foucault aplicó el mismo principio en el que se basaba su péndulo en la invención del giroscopio, una palabra que él mismo acuñó. Un giroscopio consiste en una rueda giratoria montada de manera que pueda moverse libremente, con independencia de la estructura de apoyo, para que el eje de giro de esa rueda apunte siempre en la misma dirección. Foucault predijo de forma correcta pero prematura en varias décadas que podía y habría de utilizarse como instrumento direccional. El principio del giroscopio se encontró después también en la naturaleza, por ejemplo cuando los científicos descubrieron que las moscas mantienen la estabilidad en el vuelo con la ayuda de unos balancines diminutos en forma de bastoncitos rígidos (en realidad, alas posteriores vestigiales) llamados «halterios»⁹⁹.

En la actualidad, se pueden encontrar péndulos de Foucault en todo el mundo en museos de la ciencia, universidades y otras instituciones. Durante los últimos cincuenta años, muchos de estos péndulos se construyeron en los talleres de la Academia de las Ciencias de California, que, en un servicio de fabricación especializado donde los haya, manufacturó casi un centenar de

⁹⁸ H. R. Crane, «The Foucault Pendulum as a Murder Weapon and a Physicist's Delight», *The Physics Teacher*, mayo de 1990, pp. 264-269, en la p. 269.

⁹⁹ H. R. Crane, «How the Housefly Uses Physics to Stabilize Flight», *The Physics Teacher*, noviembre de 1983, pp. 544-545.

péndulos para instituciones de todo el mundo, desde Turquía a Israel pasando por Pakistán, Kuwait o Escocia. A menudo los clientes compraban los componentes esenciales y luego los ornamentaban con sus propias interpretaciones estilizadas¹⁰⁰. El péndulo del Museo de la Ciencia de Boston se balancea sobre un modelo de vistoso colorido del calendario de piedra azteca, y la pesa cruza justo por encima de la cabeza del dios del Sol, Tonatiuh. El péndulo de la Biblioteca Pública de Lexington, en Kentucky (EE. UU.), que fue inaugurado en una ceremonia con corte de cable incluido en la medianoche del fin de año de 2000, tiene sensores en el suelo para seguir los movimientos del péndulo, en lugar de los habituales pivotes. El Hospital de Niños Montefiore de Nueva York pidió al artista neoyorquino Tom Otterniss que diseñara la pesa y la estructura circundante. La pesa tiene el aspecto de una cara alegre puesta boca abajo, tocada con un cucurucho que es el encargado de tumbar los pivotes. Se balancea sobre un mapa del mundo en relieve de plata y bronce centrado en el Bronx, donde se encuentra el hospital. Pegados a la pesa, al cable y a la valla circundante se pueden ver, en distintas poses cómicas, pequeñas esculturas de personajes contruidos a partir de formas geométricas. Casi todos los visitantes del hospital preguntan sobre ellas. Aunque el Hospital de Montefiore es sólo una de muchas instituciones cuyos péndulos se balancean por encima de un mapa centrado en el edificio que

¹⁰⁰ Los componentes esenciales son el cable, la montura del cable y un pequeño dispositivo «persuasor» en la montura del cable. Este dispositivo, que es una versión moderna del que utilizó Foucault pero que se instala en la montura del cable en lugar de en la base, propina al cable un pequeño impulso de vez en cuando para impedir que el péndulo se frene.

alberga la exhibición, el péndulo en realidad ilustra el hecho de que todas y cada una de las localidades de este mundo en rápida rotación se mueven al unísono, que todas son, al menos en este aspecto, iguales. De manera muy apropiada, el edificio central de las Naciones Unidas en Nueva York alberga un péndulo de Foucault junto a la gran escalera ceremonial de su vestíbulo, una esfera bañada en oro de 90 kilogramos de peso y 30 centímetros de diámetro que oscila desde una altura de 23 metros. La Smithsonian Institution, el museo nacional de Estados Unidos, solía exhibir un péndulo de Foucault, pero fue retirado para hacerle sitio al proyecto de restauración de la bandera de barras y estrellas, el símbolo nacional. El péndulo yace ahora en un almacén del museo¹⁰¹.

Como el experimento de Young, el péndulo de Foucault tiene que realizarse con más cuidado de lo que parece. En un espacio público, un problema importante es proteger el péndulo de los visitantes, que a menudo sienten un impulso irresistible de alargar la mano para tocarlo. Y aunque un péndulo es uno de los dispositivos más simples de la ciencia, en el mundo real los péndulos se ven afectados por corrientes eléctricas, por la estructura interna del cable, por el tipo de sujeción del mismo y por la forma como se dé el primer impulso a la pesa. Cualquiera de estos factores puede

¹⁰¹ Lo que varía en los diversos péndulos es la tasa con la que cambia su dirección, que es función de su localización geográfica. En los polos Norte y Sur, el péndulo realizaría un círculo completo de 360 grados cada 24 horas, desplazándose quince grados cada hora, en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte y en el sentido contrario en el hemisferio sur. En el resto del globo, la tasa de cambio por hora depende de la latitud del siguiente modo: la desviación horaria es de quince grados multiplicado por el seno de la latitud. En Londres, es poco menos de doce grados; en París, once grados por hora; Nueva York, nueve $\frac{3}{4}$ grados por hora; Nueva Orleans, siete grados; Sri Lanka, menos de dos grados por hora.

desviar el péndulo o llevarlo a dibujar un ocho. (Una indicación de que un péndulo dibuja un ocho es que aparezcan pivotes tumbados hacia el interior del círculo). En la Universidad Stony Brook, de la que soy profesor, un físico decidió en una ocasión demostrar el principio de Foucault en una clase de introducción a la física e hizo que un técnico atara un bolo al techo del aula y lo dejó en marcha mientras explicaba a su clase el principio y calculaba el ángulo que debía desplazarse durante los 40 minutos que duraba la clase. Al concluir ésta, midió el ángulo y vio con satisfacción que era exactamente la cantidad calculada, pero ¡en la dirección equivocada! El error se debía sin duda a alguna combinación de un deficiente sistema de suspensión y las corrientes de aire del auditorio.

Un péndulo de Foucault se aleja bastante de otras exhibiciones de museo. Su enorme tamaño es una de las razones: no se puede encerrar en una cabina o tras un cristal, sino que exige un espacio enorme, como un hueco de escalera o una nave. No produce chispas, ni zumbidos ni ruidos, sino que se mueve con solemne majestuosidad. Y lo que es más importante, no sólo no es interactivo sino que parece ignorarnos completamente mientras nos revela algo contrario a la intuición y la experiencia humana. Esto, y su conexión con vastas fuerzas físicas, quizá explique por qué la gente tiende a recordar la primera vez que vio un péndulo de Foucault.

El mío siempre hizo la misma actuación en cada una de mis visitas al Instituto Franklin, pero no por eso dejó de embelesarme con su inquietante simplicidad. Se movía pero permanecía siempre igual.

Giraba pero me decía que era yo quien estaba girando. Lo miraba, y lo que me devolvía era mi movilidad y la de todo lo que me rodeaba. Me proporcionaba así una sensación clara y dramática, cuyo auténtico significado sospechaba que nunca acabaría de comprender del todo, de los límites y los engaños de mi propia percepción y experiencia.

Interludio

La ciencia y lo sublime

Porque la belleza no es más que el principio del terror que apenas podemos soportar y que nos sobrecoge porque serenamente desdeña aniquilarnos.

RAINER MARIA RILKE

El péndulo de Foucault tiene una belleza que podríamos llamar sublime. Frente a la belleza que nos ofrece su visión clara y nos integra en la naturaleza haciendo que nos sintamos más a gusto en el mundo, lo sublime nos desconcierta porque nos enfrenta a un poder terrible. En lo sublime, nuestra existencia se nos aparece insignificante y la naturaleza, incomprensible y sobrecogedora como un poder extraño a nosotros.

Sobre la naturaleza de lo sublime reflexionaron en el siglo XVIII filósofos como Edmund Burke e Immanuel Kant, que tendían a afrontar lo bello y lo sublime más que a ver esto último como una forma de lo primero. Burke escribió que la experiencia de lo sublime viene provocada por el terror, «el principio rector de lo sublime». Lo

terrible (que para Burke no es sólo de origen natural, sino que puede tener origen humano, como en el terror político) hace que se desmoronen nuestras estrategias habituales para hacer frente al mundo e inspira «la emoción más fuerte que la mente es capaz de sentir». Pero en una experiencia sublime (como la que hace posible una interpretación artística) lo terrible se mantiene a una distancia segura de manera que no nos sentimos en un peligro inminente. De una experiencia así podemos obtener placer, continúa Burke, porque nos sentimos capaces de existir pese a lo terrible, capaces todavía de acabar encontrando un lugar para nosotros mismos. Esta conciencia no sólo nos proporciona cierta forma peculiar de placer, sino que también nos hace sentir más vitales¹⁰².

Kant, que escribió poco después de Burke, distinguía en lo sublime dos tipos. El primero, que llamaba «lo sublime matemático», se asocia con las magnitudes inconcebiblemente grandes, como la experiencia de las pirámides o de la basílica de San Pedro en Roma, que nos hacen sentir que nuestra imaginación es inadecuada para aprehender el todo. El otro, «lo sublime dinámico», se asocia con las fuerzas abrumadoras: «Elevados peñascos suspendidos en el aire y como amenazando, nubes tempestuosas reuniéndose en la atmósfera en medio de los relámpagos y el trueno, volcanes desencadenando todo su poder de destrucción, huracanes sembrando tras ellos la devastación, el inmenso océano agitado por

¹⁰² Edmund Burke, «A Philosophical Inquiry into the Origin of Our Ideas of the Sublime and the Beautiful», 4. ed., Cotter, Dublín, 1707, parte 1, sección 6.

la tormenta, la catarata de un gran río¹⁰³». Para Kant nuestra razón intenta medir y controlar estas y todas las cosas produciendo categorías adecuadas a ellas, pero en lo sublime experimentamos el fracaso de este intento y llegamos incluso a comprender que *nunca* lo lograremos. Nuestra sensibilidad nos deja en el desamparo. Esta experiencia es dolorosa, pero al mismo tiempo revela en nuestro interior la presencia de un poder (nuestra propia subjetividad) que nunca podrán tocar esas cosas que en potencia pueden aniquilarnos físicamente, y ésta es una revelación liberadora. Esta sensación de desagrado contiene su propia forma de placer, un placer perverso que, a través de la emoción más que del pensamiento, nos hace conscientes de la libertad y la trascendencia humana de la naturaleza: cosas que merecen nuestra veneración.

El péndulo de Foucault exhibe lo sublime en la ciencia. Tiene poco en común con el experimento de Eratóstenes, que midió una longitud (la circunferencia de la Tierra) ya conocida aunque con imprecisión; o con los experimentos del plano inclinado de Galileo, que lo llevaron a formular una ley matemática; o con los experimentos de Newton con prismas, que revelaron un aspecto nuevo de la naturaleza. Pero todos los experimentos científicos tienen un toque de sublimidad, puesto que revelan que la naturaleza es infinitamente más rica que los conceptos y procedimientos con que nos acercamos a ella. No obstante, el

¹⁰³ Immanuel Kant, *Critique of Judgment*, tr. W. Pluher, Hackett, Indianapolis, 1987, sección 47. (Hay trad. cast.: *Crítica del juicio*, Espasa-Calpe, Pozuelo de Alarcón, 2005; y versión de libre acceso en la Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes). Otra forma de lo sublime es la transmitida por Umberto Eco en su novela *El péndulo de Foucault*, tr. R. Pochtar Brofman, Lumen, Barcelona, 1989.

péndulo de Foucault pone especialmente de manifiesto lo sublime por la forma dramática con que descubre la ineptitud de la percepción humana, o más bien su disconformidad frente al funcionamiento de la naturaleza.

La conexión entre el péndulo de Foucault y lo sublime, en sus diversas manifestaciones desde Burke a Kant y a Umberto Eco, ayuda a explicar la celebridad de que gozó en su tiempo y por qué sigue siendo tan cautivador. No es cautivador porque nos enseñe que la Tierra gira, o porque haya sido un hito en el camino hacia un instrumento de navegación indispensable, el giroscopio. Es cautivador porque parece convocar unas verdades inesperadamente profundas, incluso insondables, sobre la propia percepción. ¿Realmente «vemos» que el péndulo se mueve pero «sabemos» que de hecho es la Tierra la que se mueve? ¿O acaso ahora, gracias al péndulo y al cartel explicativo junto a la escalera, realmente «vemos» cómo se mueve la Tierra? En cada uno de estos casos, la ciencia gobierna sobre la percepción, refutándola en el primero y corrigiéndola en el segundo.

¿O quizá lo que sucede es que al experimentar el péndulo de Foucault nuestra percepción es guiada y reeducada, no tanto por la cruda actuación del balanceo de la pesa ante nuestros ojos como por las explicaciones que se nos ofrecen, por la autoridad de las personas que las elaboran, por lo comprensible de los modelos que se nos muestran, por el modo en que estos modelos integran todas las otras cosas que sabemos, etc.? Y si es posible reeducar tan radicalmente nuestra percepción como en este caso, ¿qué otros

misterios nos esperan? ¿A qué otras cosas estamos ciegos a causa de nuestra particular educación perceptual? ¿Qué otras cosas nos reserva la percepción? Comprender esto e inquietarse es experimentar lo sublime.

Capítulo 8

Ver el electrón

El experimento de la gota de aceite de Millikan



El aparato de las gotas de aceite de Robert Millikan.

Cuando el físico estadounidense Robert Millikan (1868-1953) pronunció el tradicional discurso de recepción del premio Nobel con el que fue galardonado en 1923, dejó a su audiencia convencida de que había visto electrones. «Quien haya visto ese experimento», dijo Millikan, refiriéndose al experimento por el que había ganado el premio Nobel, «literalmente *ha visto* electrones¹⁰⁴».

La terca insistencia de Millikan en que su experimento permitía literalmente ver partículas subatómicas era en parte una forma de

¹⁰⁴ El mejor artículo sobre el experimento de Millikan sigue siendo el clásico de Holton, «Subelectrons, Presuppositions, and the Millikan-Ehrenhaft Dispute», en *The Scientific Imagination: Case Studies*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1978, pp. 25-83; otros estudios al respecto se comentan y referencian en Ullica Segerstråle, «Good to the last drop? Millikan Stories as 'Canned' Pedagogy», *Science and Engineering Ethics* 1:3 (1995), pp. 197-214.

defensa, resentido como estaba por una disputa con otro científico que había cuestionado su trabajo. Pero su afirmación de que podía ver los electrones se basaba en algo distinto a la afirmación de Foucault de que podía ver cómo giraba el mundo, y ello gracias al extraordinario entorno que había creado el instrumento que con este fin había construido en su laboratorio.

Cuando Millikan comenzó su larga serie de experimentos sobre el electrón en 1907, ya llevaba más de diez años en la Universidad de Chicago, acababa de conseguir una plaza fija, estaba casado y tenía tres niños, y rozaba los cuarenta años de edad. Aunque había escrito varios libros de texto que habían sido bien recibidos, su carrera investigadora iba a la zaga y estaba deseoso de realizar una contribución original a la física, así que decidió centrar sus esfuerzos en determinar la carga eléctrica del electrón.

«Todo el mundo estaba interesado en la magnitud de la carga del electrón», escribió en su autobiografía «porque probablemente fuera la entidad más fundamental e invariable del universo, y pese a ello nunca hasta entonces se había medido su valor con una precisión de siquiera el 100 por 100 [es decir, una incertidumbre tan grande como la propia magnitud que se medía¹⁰⁵]». Así como uno de los principales retos de la ciencia durante el siglo XVIII fue medir la densidad de la Tierra, y a partir de ella la constante de la gravitación, uno de los principales retos que se planteaba la física a principios del siglo XX era medir la carga de un electrón. Y por la

¹⁰⁵ Millikan, *Autobiography*, Houghton Mifflin, Nueva York, 1950, p. 69.

misma razón: porque esa información nos diría mucho sobre la estructura del mundo.

En su discurso de recepción del Nobel, Millikan introdujo el tema de la electricidad pidiéndole a su audiencia que tomara en consideración «unos pocos experimentos sencillos y familiares». Si se frota una barrita de vidrio contra un mechón de pelo de gato y luego se toca con ella una bola de médula de saúco, la bola parece adquirir una «nueva y sorprendente propiedad» que la lleva prácticamente a saltar apartándose de la barra de vidrio. Éste, decía Millikan, es un fenómeno elemental de la electricidad: algo llamado «carga eléctrica» pasa por la barra hasta la bola de saúco y, a consecuencia de ello, los dos objetos se repelen. Benjamin Franklin había teorizado que esa carga consistía en una gran cantidad de diminutas partículas o átomos de electricidad, o sea, que el fenómeno se desarrollaba a través de minúsculos corpúsculos o paquetes. A finales del siglo XIX los científicos habían demostrado a satisfacción que Franklin tenía razón: la carga era transportada por unos cuerpos diminutos llamados «electrones», que de alguna manera formaban parte esencial de los átomos. Sin embargo, no sabían si la carga de los electrones individuales venía en paquetes de un tamaño concreto o si podía tomar cualquier valor. Esa información revestía un interés fundamental para los físicos interesados en la estructura del átomo y para los químicos interesados en los enlaces entre moléculas. Pero ¿cómo podía encontrarse y medirse ese diminuto corpúsculo de electricidad?

Millikan sabía que dedicarse de pleno a medir la carga del electrón era arriesgado. Implicaba dejar de lado una carrera sólida como escritor de libros de texto para embarcarse en una aventura arriesgada en la investigación física. Sabía por sus anteriores roces con la investigación «cuántas prospecciones se podían llegar a hacer en física sin dar nunca con una veta de oro». Su objetivo, medir la carga eléctrica de un electrón individual, era excepcionalmente difícil. Aislar y trabajar con una sola de estas partículas inconcebiblemente pequeñas sería un reto importante en cualquier circunstancia, pero en su época ni siquiera estaba claro cuál era la mejor manera de acometer el experimento. Millikan, por así decirlo, no sólo intentaba escalar una alta montaña, sino que intentaba hacerlo sin tener la menor idea de cuál de sus caras permitiría el ascenso más fácil, o siquiera posible. Lo que es peor, el gran interés científico que despertaba la magnitud de la carga del electrón hacía que fueran muchos los que intentaban medirla. Millikan estaría trabajando en un campo abarrotado y competitivo, expuesto al peligro de que otros, quizá más experimentados o mejor preparados para la investigación, consiguieran hacer la medición más rápida y con mayor precisión. Necesitaría suerte e ingenio.

Los principales competidores de Millikan estaban en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge. Su director, J. J. Thomson, había descubierto el electrón en 1897 (en rigor, Thomson había descubierto que todos los electrones tenían la misma relación entre carga y masa) y conocía bien el valor de una determinación precisa de su carga; dirigía por aquel entonces un equipo de

estudiantes de gran talento que estaban atacando el problema. Habían intentado todo tipo de estrategias, y las más prometedoras se basaban, curiosamente, en la creación de una nube de gotas de agua en el laboratorio.

Unos pocos años antes, uno de los colaboradores de Thomson había inventado un dispositivo, llamado «cámara de niebla», que creaba nubes en el interior de una cámara. Esto se lograba haciendo que el aire supersaturado (lleno de vapor de agua) de su interior se condensara alrededor de las partículas de polvo y otras partículas que flotaran libremente en el aire y contuvieran unas cargas eléctricas llamadas «iones» (que, cuando están cargadas negativamente, contienen una o más cargas de electrón). El hecho de que el aire supersaturado se condensara alrededor de los iones hizo inesperadamente que el dispositivo se revelara útil para seguir las trayectorias de partículas cargadas y de movimiento rápido como las emitidas por las sustancias radiactivas, puesto que esas partículas dejaban rastros de iones a su paso. En 1898, un año después de descubrir el electrón, Thomson había utilizado este principio para hacer una estimación aproximada de la carga de los electrones. Había utilizado una fuente radiactiva para crear iones negativos (es decir, electrones) en el aire del interior de una cámara de niebla, y luego había provocado que ese aire supersaturado se condensara sobre los iones creando, por así decirlo, una nube de bolitas de médula con la superficie recubierta de cargas. Entonces midió la carga total de la nube y estimó el número total de gotas en la niebla. Esta tarea a primera vista difícil puede lograrse midiendo

la tasa con que la superficie superior de la niebla cae en el interior de la cámara. Gracias a una ecuación conocida como Ley de Stokes, que describe el movimiento de gotas minúsculas en un fluido, Thomson pudo calcular el tamaño medio de las gotas individuales que componían la nube simplemente midiendo la velocidad con la que caía la nube. (Para hacerlo, de acuerdo con la Ley de Stokes necesitaba conocer la densidad de las gotas, lo cual era fácil, puesto que eran de agua, así como la viscosidad del medio por el que caían, lo que también era fácil puesto que ese medio era el aire). Sabiendo el volumen total de vapor de agua dentro de la nube y el tamaño medio de las gotas, Thomson pudo calcular el número de gotas que contenía la nube. Bajo la suposición de que cada gota de agua de la nube se había condensado alrededor de un único electrón, estos datos le permitieron dividir la carga de la nube por el número de gotas para obtener una estimación aproximada de la carga de cada electrón.

Un estudiante de Thomson, Harold Wilson, mejoró este método mediante la instalación de unas placas metálicas horizontales dentro de la cámara de niebla de modo que se pudiera crear un campo eléctrico en el interior del aparato. Cuando conectaba la electricidad, todas las cargas que había en la región comprendida entre las dos placas eran atraídas por el campo. Con la ayuda de un cronómetro, Wilson midió y comparó la velocidad con que caían las gotas entre una serie de marcas, primero bajo la sola influencia de la gravedad y luego bajo la influencia de la gravedad más el campo eléctrico, que atraía a las gotas hacia abajo un poco más rápido.

Esto resultó ser una mejora importante porque proporcionaba a Wilson una manera de asegurarse de que la capa de niebla que medía estaba compuesta de gotitas que contenían electrones, ya que las gotas con electrones caían más rápido bajo un campo eléctrico que bajo la sola influencia de la gravedad. También le permitió seleccionar las gotas con la menor carga, puesto que las gotas que se hubieran condensado alrededor de varios electrones tendrían una carga mayor y por lo tanto caerían más rápido. Con todo, el método de Wilson era sólo aproximado, ya que las nubes se evaporaban muy rápidamente y las creadas sucesivamente eran muy distintas y difíciles de comparar.

Millikan comenzó sus investigaciones en 1906 con un estudiante de doctorado llamado Louis Begeman. Primero probaron el método de Harold Wilson, pero no lograron que funcionara de ningún modo: la pobre definición e inestabilidad de la superficie superior de la nube hacían imposible medir nada con un mínimo de precisión. Cuando Millikan presentó su trabajo en un congreso en Chicago, el eminente científico Ernest Rutherford le hizo ver que una de las grandes dificultades era la gran velocidad con la que se evaporaban las diminutas gotas de agua. Frustrado, Millikan comprendió que debía realizar cambios drásticos en su método para combatir el problema de la evaporación, además de algunas otras dificultades.

El científico estadounidense decidió estudiar la tasa de evaporación de manera que pudiera compensarla de algún modo, un ejemplo más de la «vigilancia del experimentador» que ya habíamos descrito en relación con el experimento de Cavendish. Decidió utilizar un

campo eléctrico más fuerte e invertir la corriente de manera que el campo atrajera las gotas cargadas hacia la placa superior, manteniendo quieta en el aire la nube mientras examinaba su tasa de evaporación. La primera vez que lo intentó, se llevó una sorpresa que le hizo pensar, al menos al principio, que su objetivo era imposible y el experimento, inútil.

Una vez tuve todo preparado y... formé la nube, accioné el interruptor para encender el campo eléctrico. Lo que vi ante mis ojos fue la disipación instantánea y completa de la nube: ya no había una «superficie superior» que pudiera situar entre las marcas de medición como Wilson había hecho y yo esperaba poder hacer.¹⁰⁶

Toda la nube, que obviamente debía estar formada por gotas condensadas alrededor de más de un electrón, había sido barrida por el fuerte campo eléctrico. Esto, según escribió Millikan, «*al principio parecía dar al traste con mi experimento, y con él, todos los otros experimentos que dependieran de la medición de la tasa de caída de una nube ionizada*».

Cuando Millikan repitió el experimento volvió a ocurrir lo mismo. Pero de repente observó algo que transformó sus ideas de manera radical: vio que habían quedado en suspensión un puñado de gotitas. «Éstas eran las gotas que por casualidad tenían la relación de carga a masa, o peso, justa para que la fuerza de la gravedad que empujaba las gotas hacia abajo quedara compensada por la acción del campo que actuaba sobre la carga eléctrica de las gotas

¹⁰⁶ *Ibid.*, p. 73.

empujándolas hacia arriba... Así se originó lo que di en llamar “*método del equilibrio de la gota*” para la determinación de e [la carga del electrón¹⁰⁷].».

Por así decirlo, Millikan había encontrado la manera de trabajar con una sola bola de saúco cada vez. Ajustando la intensidad del campo eléctrico dentro de la cámara podía hacer que las gotas se movieran hacia abajo o hacia arriba, o incluso que quedaran suspendidas sin moverse. Tras realizar el experimento muchas veces, observó que la carga necesaria para equilibrar las gotas era siempre un múltiplo exacto de la carga más pequeña que había observado en una gota. Ésta fue la primera prueba inequívoca de la naturaleza discreta de la carga eléctrica.

Millikan decidió entonces volver a construir su aparato para estudiar gotas individuales en lugar de una nube. La nueva versión consistía en una cámara en la que las gotas de agua cargadas caían por un pequeño agujero practicado en una placa horizontal, entrando así en un área donde, con la ayuda de un microscopio, podía verse cómo subían o bajaban entre dos marcas de medición¹⁰⁸.

El estadounidense tuvo mucha suerte con este experimento, y lo sabía. Sólo un conjunto de parámetros situados dentro de márgenes muy estrechos permitían que el experimento funcionara; si las gotas

¹⁰⁷ *Ibid.*

¹⁰⁸ Holton escribió que «Millikan no diseñó o concibió el experimento que le dio la fama, sino que más bien lo descubrió... Nadie dudaba de la existencia de gotas individuales. Cualquiera hubiera podido ensamblar sus componentes, que ya existían desde hacía al menos una década, sólo con que hubiera pensado en observar una gota en lugar de una nube... El dominio que sobre la imaginación ejercía la tradición de investigar con nubes sólo cedió ante el descubrimiento accidental de Millikan». (Holton, *op. cit.*, p. 46).

hubieran sido más pequeñas, el movimiento browniano (el movimiento aleatorio de las partículas pequeñas suspendidas en un fluido causado por colisiones con las moléculas del fluido) hubiera hecho imposible su observación, y de haber sido más grandes, no hubiera podido crear el voltaje necesario para mantenerlas estacionarias. «La naturaleza fue amable conmigo», escribió Millikan años más tarde. «Apenas ninguna otra combinación de dimensiones, fuerza de campo y materiales hubiera producido los resultados obtenidos».

En el otoño de 1909 el científico envió su primer artículo importante sobre su método del «equilibrio de las gotas», que fue publicado el siguiente mes de febrero. El artículo es notable por la honestidad de su presentación; en lo que el historiador de la ciencia Gerald Holton describe como «un gesto poco común en la literatura científica», Millikan incluyó sus juicios personales sobre la fiabilidad y validez de cada una de las 38 observaciones de gotas. Así, señaló con tres asteriscos las dos «mejores» observaciones, que había realizado «en condiciones que podemos considerar perfectas», es decir, que había podido observar la gota durante el tiempo suficiente para asegurarse de que era estacionaria, había podido cronometrar su paso entre las dos marcas de medición y no había observado ninguna irregularidad en su movimiento. Marcó con dos asteriscos siete observaciones «muy buenas», con un asterisco diez observaciones «buenas» y dejó sin marcar trece observaciones «pasables». Igualmente notable es el hecho de que Millikan dijera con toda franqueza que había descartado tres observaciones

«buenas» (y cuya inclusión no hubiera alterado las conclusiones) porque había visto algo en su posición o en las características del campo que hacían el valor incierto; tres a causa de cambios en el valor del campo; y otra observación simplemente porque era un valor atípico con una carga estimada un 30 por 100 inferior a las otras y Millikan consideró que debía tratarse de algún error experimental. Como Holton señala, «es obvio que Millikan sabía qué era una buena ejecución del experimento y qué no lo era, y no iba a pasar por alto ese conocimiento sólo porque no estuviera claro de qué manera cuantificarlo y publicarlo¹⁰⁹». Los juicios personales son comunes en el proceso científico, pero los experimentadores rara vez los reconocen, y mucho menos en una publicación.

Pero de desagradecidos está el mundo lleno, y Millikan pronto hubo de lamentar su honestidad. Ese mismo año, un físico de la Universidad de Viena llamado Felix Ehrenhaft (1879-1952) entró con fuerza en el debate. Con un aparato parecido al de Millikan pero en el que usaba diminutas partículas de metal en lugar de gotas, el físico austriaco afirmó en una publicación de 1910 que sus resultados probaban la existencia de «subelectrones» con cargas inferiores a las que Millikan sostenía que era la menor. No sólo eso, sino que Ehrenhaft recalculó los datos de Millikan y, tras incluir las observaciones que éste había descartado como poco fiables, logró hacer que pareciera que los datos del experimentador de Chicago apoyaban sus propias conclusiones.

¹⁰⁹ *Ibid.*, p. 53.

Para cuando apareció publicado el artículo de Ehrenhaft, Millikan ya había averiguado cómo mejorar enormemente su experimento. En agosto de 1909, poco después de enviar para su publicación su primer artículo, había viajado a Winnipeg (Canadá) para asistir a un congreso de la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, cuyo presidente aquel año no era otro que el mismísimo J. J. Thomson. Aunque el estadounidense no había pretendido siquiera estar en el programa, llevó consigo sus resultados, pidió que le dejaran hablar y atrajo una gran atención con su presentación. Poco después de este congreso decidió sustituir las gotas de agua con gotas de una sustancia más pesada y una tasa de evaporación menor, como el mercurio o un aceite; así como utilizar un tipo distinto de bola de saúco. En su autobiografía, que escribió veinte años más tarde, Millikan dice haberse dado cuenta de esto en un momento de ¡eureka! que se habría producido durante su viaje de vuelta, cuando comprendió que no tenía sentido luchar contra la evaporación de las gotas de agua cuando los aceites de relojería se habían desarrollado explícitamente para resistir a la evaporación¹¹⁰. Como muchos momentos de este tipo, sin embargo, la manera en que se produjo está tan poco definida como la superficie de la nube en la cámara de niebla. En los artículos escritos en la época, Millikan atribuye a su colega J. Y. Lee la idea del método de atomización para producir las minúsculas gotas esféricas necesarias para su experimento. Y un estudiante de doctorado de Millikan, Harvey Fletcher, afirmó más tarde que era a él a quien se le había

¹¹⁰ Millikan, *Autobiography*, p. 75.

ocurrido la idea de utilizar gotitas de aceite. Lo más probable es que a nadie se le ocurriera la idea completa, que no haya habido un único momento de ¡eureka! El problema de cómo evitar la evaporación estaba muy presente en la mente de todos los involucrados en el experimento.

Cuando Millikan regresó a Chicago desde Winnipeg, se apresuró a volver a su laboratorio de Ryerson Hall, en uno de los márgenes de la arbolada plaza central del campus. Visto desde fuera, cuesta creer que una estructura como ésta, un magnífico edificio neogótico con almenas, fuera construida para ser uno de los principales laboratorios de física de Estados Unidos a finales del siglo XIX. Ni siquiera en su interior las enormes vigas de roble y la fenomenal escalera de caracol nos hablan de un laboratorio. Es un edificio sólido, bien aislado y construido con madera y cemento, y sin hierro para evitar perturbaciones magnéticas que pudieran interferir en los experimentos que utilizaran campos magnéticos o eléctricos débiles, siguiendo las indicaciones del físico Albert Michelson, que había insistido en ciertas especificaciones y materiales de construcción para facilitar sus propios experimentos.

Al entrar en Ryerson, Millikan se cruzó con Michelson. Le explicó a su colega que se le había ocurrido un método que le permitiría determinar la carga del electrón con una precisión de una décima parte de un 1 por 100 si es que «valía algo como físico». Enseguida fue al taller a encargarse un nuevo aparato para su método de equilibrado de las gotas, pero que usara aceite en lugar de agua. Como había hecho antes, su idea era crear cargas eléctricas

negativas en el interior de una cámara llena de gotitas, sólo que ahora serían de aceite; escogería una gota y la dejaría caer durante unas pocas fracciones de segundo bajo la sola influencia de la gravedad. Esto le permitiría calcular el radio de la gota. Entonces pondría voltaje en las placas y empujaría la gota hacia arriba, luego hacia abajo, luego otra vez hacia arriba. Observaría las gotas a través de una pequeña ventana, iluminada desde el lado opuesto por un haz de luz. Midiendo el tiempo que tardaran las gotas en subir y en caer podría calcular su carga.

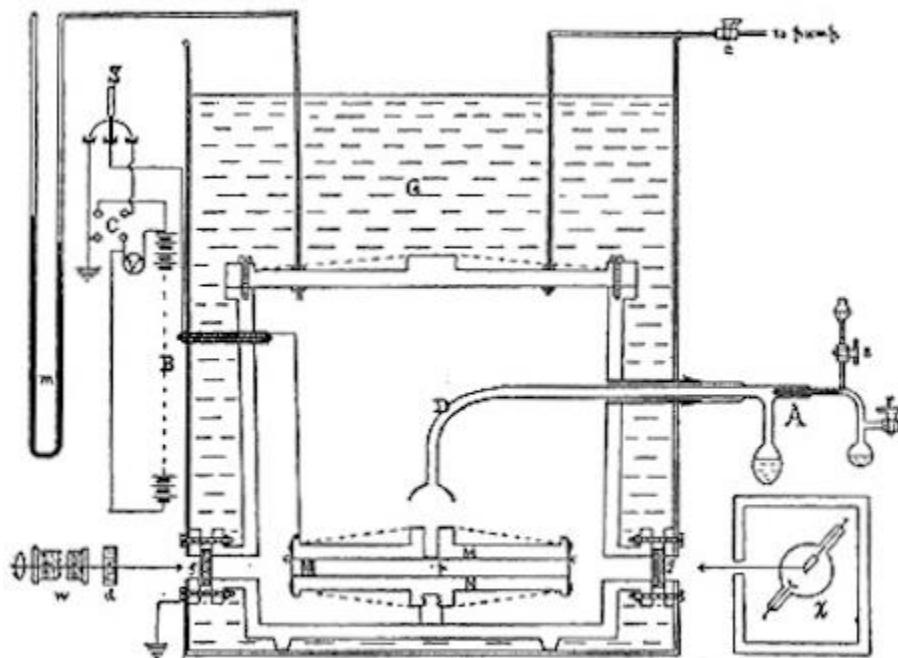


FIG. 8.—A, atomizer through which the oil spray is blown into the cylindrical vessel D. G, oil tank to keep t temperature constant. M and N, circular brass plates, electrical field produced by throwing on 10,000-volt battery. Light from arc lamp c after heat rays are removed by passage through w and d, enters chamber through glass window and illuminates droplet p between plates M and N through the pinhole in M. Additional ions are produced about p) X-rays from the bulb X.

Figura 8.1. Diagrama de Millikan, con el pie de figura original, de su experimento de las gotas de aceite.

Desde que tuvo el nuevo aparato, Millikan dedicó casi todo el tiempo que le dejaba la docencia a su experimento. Su mujer, Greta, tuvo que acostumbrarse a su ausencia y a inventarse excusas cuando tenían invitados a cenar. En una ocasión, tras faltar a una cena que ofrecían en su casa, Millikan se tropezó con uno de sus convidados, quien le felicitó por lo mucho que ayudaba en la casa, algo que obviamente no era así. Lo que había ocurrido, según supo después, es que Greta le había explicado a este invitado la ausencia de Millikan diciéndole que «lleva media hora mirando un ion y tiene que acabar el trabajo», pero el invitado había entendido que «lleva media hora con un pantalón y tiene que acabar el trabajo¹¹¹».

En septiembre de 1910, Millikan publicó un segundo artículo importante sobre la carga de los electrones, el primero basado en gotas de aceite, en la prestigiosa revista *Science*. Todavía no había visto el artículo de Ehrenhaft, publicado unos meses antes, en el que usaba los propios datos de Millikan para atacarlo, así que escribió su artículo con la misma franqueza que el anterior. Aunque en éste no ordena las gotas según su fiabilidad, dice explícitamente no haber incluido varias de ellas en sus cálculos de la carga de un electrón. En algunos casos, según explica, la causa era un error experimental grande, «cuando las velocidades son demasiado lentas las corrientes de convección residuales [remolinos en el aire causados por el calor] introducen errores, y cuando son demasiado rápidas, la medición del tiempo se vuelve incierta». En otros casos, las omite porque sus valores eran «atípicos», porque se desviaban

¹¹¹ *Ibid.*, p. 83.

mucho del resto de la norma. De haber incluido esas gotas, sin embargo, el valor medio no hubiera cambiado de manera significativa, sólo hubiera aumentado el error experimental. Millikan escribió que «el método usado es tan simple y las conclusiones se siguen de forma tan inevitable de los datos experimentales que cualquier persona podría entender el método y comprender los resultados¹¹²».

El de Chicago siguió mejorando su experimento, por ejemplo con un cronómetro más preciso y un mejor control de la temperatura, y realizó nuevas mediciones a lo largo de 1911 y parte de 1912. En la primavera de este último año, por ejemplo, Millikan pasó varias semanas examinando docenas de gotas de aceite, observándolas a través del microscopio que había instalado en la pared de la cámara. En la tarde del viernes 15 de marzo se pasó media hora mirando por el microscopio la gota número 41, usando un cronómetro para medir el tiempo que tardaba en subir y volver a caer entre dos marcas diminutas. Ésta en concreto la podía ver con una gran claridad, sin las perturbaciones habituales como las corrientes de aire. Pese a lo tedioso del trabajo, fue entusiasmándose y, cuando escribió sus notas de laboratorio, añadió en la esquina inferior de la izquierda una línea citada en la introducción de este libro: «¡Qué belleza! ¡Hay que publicarlo¹¹³!».

Para entonces, Millikan ya había leído el artículo de Ehrenhaft y varios otros escritos de algunos de sus seguidores más vehementes

¹¹² Millikan, «The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of Its Charge, and the Correction of Stokes' law», *Science* 32 (1910), p. 436.

¹¹³ La página en cuestión de su cuaderno está reproducida en Holton, «Subelectrons», p. 64.

que tildaban de falso su artículo argumentando que sus propios datos demostraban la existencia de subelectrones. En 1913, Millikan publicó un artículo exhaustivo basado en el trabajo realizado con su nuevo aparato. Dolido sin duda por las acusaciones del austríaco, refiere en su defensa que los datos que presenta provienen de una serie de observaciones sobre 58 gotas que, según señala con cierta mordacidad, «no es un grupo selecto de gotas sino que constituye el conjunto completo de las observadas experimentalmente a lo largo de 60 días consecutivos¹¹⁴». Su trabajo, según concluye, establecía el valor de la carga de un electrón ($4,774 \pm 0,009 \times 10^{-10}$ unidades electrostáticas, o uee) con una precisión del 0,5 por 100.

La comunidad científica aceptó los resultados de Millikan basándose no sólo en este artículo sino también en toda la evidencia en favor del carácter discreto de la electricidad. Fue en parte gracias a este trabajo que le fue concedido el premio Nobel en 1923. Ehrenhaft siguió defendiendo su teoría de los subelectrones durante algunos años, pero a la larga abandonó la causa. Años más tarde se obsesionó con otra: los monopolos magnéticos, algo así como imanes con un sólo extremo imantado. (Quizá existan, pero nadie los ha visto). En algunas ocasiones, Ehrenhaft aparecía en congresos científicos blandiendo unas supuestas pruebas de su existencia. En 1946 se produjo un episodio patético durante la reunión anual de la Sociedad Física Americana en Nueva York. El

¹¹⁴ Millikan, «On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant», *Physical Review* 2 (1911), pp. 109143.

joven teórico Abraham Pais estaba presentando sus ideas cuando lo interrumpió Ehrenhaft, que ya rayaba los setenta y todavía defendía la causa de los monopolos. Se acercó al estrado exigiendo ser escuchado y hubo de ser cortésmente acompañado fuera de la sala.

Un joven físico llamado Herbert Goldstein estaba sentado junto a su mentor, Arnold Siegert. «La teoría de Pais es mucho más disparatada que la de Ehrenhaft», le dijo Goldstein a Siegert. «¿Por qué a Pais lo llamamos físico y a Ehrenhaft loco?».

Siegert reflexionó unos instantes. «Porque», le dijo, «Ehrenhaft se cree su teoría¹¹⁵».

Lo que Siegert quería decir es que la fuerza de la convicción de Ehrenhaft se había interpuesto en la actitud por lo general juguetona que precisan los científicos, la capacidad de arriesgarse e improvisar. (La convicción, decía Nietzsche, es mayor enemiga de la verdad que la mentira).

¿Tenía razón Ehrenhaft en su acusación de que Millikan había amañado sus datos? El examen que hizo Holton de los cuadernos de laboratorio de Millikan con las anotaciones sobre el trabajo en que se basaba su artículo de 1913 revela que en realidad Millikan había estudiado 140 gotas y no las 58 que mencionaba en él. La afirmación de Millikan de que «no es un grupo selecto de gotas sino que constituye el conjunto completo de las observadas experimentalmente a lo largo de 60 días consecutivos» era, por consiguiente, falsa. Aunque llamado a causar consternación, este descubrimiento no preocupó en exceso a Holton. Este autor sugiere

¹¹⁵ Comunicación personal, Herbert Goldstein.

dos explicaciones parciales. Una es la controversia con Ehrenhaft; Millikan, convencido de tener razón, no quería darle munición al austriaco, que en su opinión sólo podía crear más confusión. La segunda razón por la que Millikan omitió mencionar las otras gotas queda clara cuando se examinan las fuentes de error que Holton encontró entre las anotaciones de los cuadernos. «Ha caído el voltaje de la batería; el nanómetro está atascado; la convección interfiere a menudo; la distancia tiene que mantenerse constante; se ha producido un error en el cronómetro; se ha estropeado el atomizador». El estadounidense, en suma, no creía que esas 82 gotas «desaparecidas» del artículo pudieran considerarse datos. Los cuadernos de Millikan distinguen claramente entre las gotas observadas en perfectas condiciones, que a menudo describe como «bellezas», y las gotas cuya observación hubiera estado afectada por diversos grados de error experimental. He aquí una muestra que Holton extrajo de los cuadernos de Millikan de la última ejecución del experimento:

Una belleza. Temp. y cond. perfectas, sin convección. Publicar [8 de abril de 1912]. Belleza; publicar [10 de abril de 1912]. Belleza; publicar [tachado y sustituido por] aparece movimiento browniano [10 de abril de 1912]. Perfecta; publicar [11 de abril de 1912]. De las mejores [12 de abril de 1912]. La mejor hasta el momento a todos los efectos [13 de abril de 1912]. Una belleza para mostrar la concordancia entre los dos métodos de medir $v_1 + v_2$; publicar sin

*duda [15 de abril de 1912]. Publicar. Buena para mostrar dos métodos para obtener v... No; algo anda mal con la temp.*¹¹⁶

Así pues, Millikan escogió las gotas para su publicación y, para no dar pábulo a las críticas de Ehrenhaft, no informó en su artículo de que omitía otras que consideraba irrelevantes para la cuestión central, que era la medición de la carga del electrón. Por usar la imagen de Holton, Millikan juzgó en cada caso qué observaciones aparecían en la «ventana» científica, qué aceptaba como dato. En cambio, Ehrenhaft y sus colaboradores «parecen haber utilizado todas las lecturas que asiduamente realizaron, tanto si eran buenas como si eran malas o indistintas». Dejaban entrar todo en la ventana, trataban todo con el mismo valor.

Desde la publicación del artículo de Holton los científicos, los historiadores y los periodistas han discutido sobre la validez y la ética del procedimiento del de Chicago. La mayoría de las veces la historia de Millikan se empaqueta a la medida de una lección histórica, limpiando lo sobrante para dejar claro el mensaje. En cierta medida este proceso se produce en todos los escritos sobre acontecimientos históricos, pero el caso de Millikan es especialmente interesante. La historiadora Ullica Segerstråle ha descrito secamente lo ocurrido con la historia del experimento que le valió un premio Nobel a Robert Millikan como un caso de «pedagogía enlatada¹¹⁷». Lo notable de este caso es la oposición frontal entre las latas en las que se ha embutido el episodio:

¹¹⁶ Holton, *op. cit.*, p. 71.

¹¹⁷ Segerstråle, *op. cit.*

Millikan, el científico brillante, en un caso, y Millikan, el ejemplo de vergonzoso fraude, en el otro.

Por razones obvias, algunos periodistas y divulgadores científicos, tras una lectura rápida del trabajo de Holton, han centrado su atención en la omisión de las gotas, y especialmente en la falsa afirmación de Millikan en su artículo de 1913, de que había incluido todas sus observaciones. Según su opinión, el premio Nobel era culpable de falta de ética científica e incluso de fraude¹¹⁸. En su libro de 1983, *Betrayers of the Truth: Fraud and Deceit in the Halls of Science (Traidores a la verdad: Fraude y engaño en los salones de la ciencia)*, los periodistas del *New York Times* William Broad y Nicholas Wade braman que «Millikan presentó su trabajo de forma falseada para que sus resultados experimentales resultaran más convincentes de lo que en realidad eran¹¹⁹». Y el médico Alexander Kohn incluye al físico estadounidense entre los «falsos profetas» de la ciencia en su libro homónimo, si bien parece estar más irritado

¹¹⁸ Las revelaciones de escándalos siempre han ejercido una poderosa atracción, pero especialmente durante el período posterior al Watergate, que es justamente cuando apareció el artículo de Holton. Algunos críticos de los medios de comunicación como David Foster Wallace han examinado la cuestión de por qué «realmente nos gusta que se desentierren, se saquen a la luz y se expongan las inmoralidades secretas y escandalosas». Las revelaciones, según Wallace, nos dan la impresión de un «privilegio epistemológico», de «perforar la superficie civilizada de la vida cotidiana» y revelar la actuación de fuerzas perversas y sórdidas, incluso malignas. David Foster Wallace, «David Lynch Keeps His Head», en *A Supposedly Fun Thing I'll Never Do Again*, Little, Brown, Nueva York, p. 208. (Hay trad. cast.: *Algo supuestamente divertido que nunca volveré a hacer*, Mondadori, Barcelona, 2001; y Nuevas Ediciones de Bolsillo, Barcelona, 2003).

¹¹⁹ Fueron muchos más los científicos eminentes desacreditados por Broad y White, entre ellos Galileo. Tomando el diálogo literario de Galileo como si fuera una narración histórica y basándose en la idiosincrásica interpretación de Galileo del historiador de la ciencia Koyré, Broad y White lo incluyeron en su lista de «casos conocidos o de los que se tienen sospechas fundadas de fraude en la ciencia» por haber «exagerado las conclusiones de sus resultados experimentales». Relegaron a una nota a pie de página algunas referencias a historiadores más recientes que han examinado con detenimiento los cuadernos de Galileo, como Settle y Drake, y presentan evidencia convincente de que Koyré estaba muy equivocado respecto a Galileo.

por la supuesta falta de reconocimiento por Millikan de la contribución de su estudiante de doctorado Fletcher que por la omisión de datos.

Por otro lado, varios historiadores, centrándose en el hecho de que Millikan utilizó lo que hoy se tiende a considerar buen juicio sobre la fiabilidad de sus datos, lo alaban como ejemplo de buen científico. Estos académicos señalan que el pensamiento científico a menudo no es tanto una cuestión de números como de buen juicio, y alegan en defensa de su tesis numerosos casos de científicos que de manera correcta interpretaron experimentos en circunstancias en las que haberse fiado estrictamente de los datos los hubiera desviado del camino. Por lo que a datos se refiere, no todos los números son creados iguales. En 1984, el historiador Allan Franklin analizó minuciosamente todas y cada una de las gotas que Millikan omitió en su artículo de 1913 y demostró que casi todas las omisiones se habían debido a razones sólidas de error experimental. Y, lo que quizá sea aún más importante, que aunque Millikan hubiera incluido todos esos datos, el resultado final no hubiera cambiado demasiado¹²⁰.

Estas historias tienden a reciclarlas quienes están más interesados en divulgar su lección favorita que en la exactitud histórica o en el proceso científico. Todas las versiones omiten complejidad. La versión de Millikan como mal científico omite las razones por las que no todos los datos son igualmente buenos y por las que a veces

¹²⁰ A. Franklin, «Forging, Cooking, Trimming, and Riding on the Bandwagon», *American Journal of Physics* 52 (1984), pp. 786-793.

conviene descartar algunos, mientras que la versión de Millikan como buen científico omite las presiones para ser el primero en obtener resultados y, en consecuencia, a comprometer la ética de veracidad en la publicación. Como Segerstråle señala, el conflicto surge en gran parte de la aplicación de dos perspectivas éticas distintas y casi incompatibles sobre el proceso científico. Según la primera, la perspectiva kantiana (o «deontológica»), la conducta ética se fundamenta en la intención de aplicarse a uno mismo las mismas reglas que todos los demás se aplican a sí mismos; según ésta, la conducta de Millikan fue poco ética porque no siguió las reglas de publicación de datos. Según la otra perspectiva, la utilitarista, lo que debe hacer la ciencia, desde el principio al fin, es simplemente obtener la respuesta correcta, y eso es precisamente lo que hizo Millikan. De hecho, como apunta la historiadora, la ciencia es tan competitiva que quienes no se apresuran a conseguir resultados rápidos y por los medios que sea tienden a abandonar la carrera.

El argumento sobre la conducta de Millikan ha hecho difícil recuperar la belleza de su experimento, pero realmente vale la pena hacerlo. Para conseguirlo, debemos preguntarnos qué es exactamente lo que Millikan *vio*. Miraba a través de un microscopio el interior de una cámara que él mismo había diseñado. Esa cámara era como un pequeño escenario en el que un actor peculiar representaba una peculiar acción. Los actores que aparecían de uno en uno en este pequeño escenario eran unas gotitas de aceite de apenas unos cuantos micrones de diámetro. Tan pequeñas que su diámetro era aproximadamente igual a la longitud de onda de la luz

visible, de modo que la luz se desviaba al chocar contra ellas y podía verse su difracción. No tenían un aspecto sólido entre las marcas de medición, sino que aparecían como discos borrosos rodeados por anillos de difracción, razón por la cual Millikan no podía medir su tamaño ópticamente y hubo de recurrir a la Ley de Stokes para determinarlo. Cada gota, al ser iluminada por una lámpara de arco, aparecía ante el científico como un centelleo de una estrella en una noche estrellada. Las gotas eran extraordinariamente sensibles a su entorno y respondían a cualquier corriente de aire, a las colisiones con moléculas de aire y a los campos eléctricos que Millikan ajustaba para moverlas. Veía cómo las gotas subían y bajaban en respuesta a los cambios en el campo eléctrico. Veía cómo se desviaban en cualquier dirección a causa de corrientes de aire. Veía cómo se sacudían nerviosamente por culpa del movimiento browniano. Podía estar mirando cómo se movía una gota en el campo eléctrico y ver de repente cómo saltaba al topar con otro ion en el aire. «Un electrón ha saltado sobre la gota. De hecho, pudimos ver el instante exacto en que saltó sobre ella y volvió a separarse¹²¹». Cuando una gota de aceite «se movía hacia arriba con la velocidad más baja que podía tomar, sabía con seguridad que llevaba a sus espaldas un solo electrón». Sabía cómo hacer que las gotas subieran y bajaran o se quedaran totalmente quietas. Se familiarizó con ellas lo bastante como para reconocer todo lo que ocurría ante su atenta mirada y para saber que todo lo que sucedía le estaba mostrando algo nuevo sobre el mundo. Hay un placer sensual en ver cómo

¹²¹ *Ibid.*, p. 83.

unos objetos responden en situaciones complejas de acuerdo con leyes que uno conoce a fondo, ver, por ejemplo, cómo una pelota de baloncesto vuela por el aire, rebota en el aro contra el tablero y luego de nuevo hacia el aro para colarse por la canasta. Pero lo que Millikan veía era una acción que le comunicaba algo primordial: la carga eléctrica fundamental. Es el tipo de belleza del que hablaba Schiller, algo que «nos conduce al mundo de las ideas sin sacarnos, sin embargo, del mundo de los sentidos».

En un antojo, una tarde que estaba en Chicago decidí ir a ver el lugar donde Millikan había realizado la famosa serie de experimentos que le había valido un premio Nobel: la medición de la carga del electrón, que sin duda había sido un momento decisivo en nuestra era electrónica. Fui a la Universidad de Chicago y busqué Ryerson Hall, pero no pude hallar ninguna placa conmemorativa. Tampoco pude encontrar a nadie en el edificio que supiera decirme en qué sala había tenido lugar el experimento; alguno incluso me preguntó quién era Robert Millikan. Una secretaria me sugirió que llamara a la Oficina de Relaciones Públicas, pero tampoco allí sabían nada. No encontré ningún rastro de Millikan o de su experimento en el edificio, que ahora alberga el Departamento de Informática. Persistirán las demostraciones de laboratorio y las versiones de su historia, pero el auténtico experimento de Millikan, como la mayoría de los experimentos, se había desvanecido entre la carpintería.

Interludio

Percepción en la ciencia

Los científicos a menudo dicen «ver» los objetos con los que trabajan, por diminutos o abstractos que sean. La bióloga Barbara McClintock comentó en una ocasión, refiriéndose a sus investigaciones sobre los cromosomas, que «descubrí que cuanto más trabajaba con ellos, más grandes se hacían, que dejaba de estar afuera para estar allí abajo, con ellos. Era parte del sistema. Estaba allí mismo con ellos y todo se hacía grande. Era capaz incluso de ver las partes internas de los cromosomas¹²²». Los astrónomos a menudo hablan de «ver» un planeta dando vueltas alrededor de un púlsar cuando, por ejemplo, captan fluctuaciones en las señales de radio emitidas por el púlsar que tienen su origen en el efecto gravitacional creado por el cuerpo en órbita. Y cuentan que hace algunos años, cuando se descubrió una nube de sodio que emitía un volcán de Io, un satélite de Júpiter, un astrónomo dijo que era «el rasgo más grande y permanentemente visible del sistema solar¹²³».

Comentarios como éstos pueden parecer poco más que un parloteo insustancial al mismo nivel que decir «veo que va a llover» cuando en realidad no se está «viendo» nada. ¿No son todas las auténticas entidades científicas, desde los electrones a los agujeros negros, imperceptibles, accesibles sólo por mediación de algún instrumento?

¹²² Citado en Evelyn Fox Keller, *Reflections on Gender and Science*, Yale University Press, New Haven, 1985, p. 165. (Hay trad. cast.: *Reflexiones sobre género y ciencia*, Institució Alfons el Magnànim, Valencia, 1991).

¹²³ Anónimo, *Science News* 139 (1990), p. 359.

La cuestión de si los científicos realmente perciben lo que estudian es importante con relación a la pregunta de si la ciencia puede ser bella. Y lo es porque la mayoría de las descripciones de la belleza hacen hincapié en que implica una percepción sensible, la aprehensión de algo de forma inmediata e intuitiva. Si los científicos trabajaran sólo con abstracciones, inferencias y ecuaciones, esa percepción sensible sería imposible.

La percepción en la ciencia es un tema complejo y fascinante, pero no es diferente en esencia de la percepción común¹²⁴. Al fin y al cabo, en la percepción común no vemos únicamente formas o manchas de color (peras verdes o lápices amarillos) sino fenómenos mucho más complejos, cosas como los ejemplos de valor, como la inteligencia, como el autoengaño y la adicción, como el juego y la ambición. ¿Cómo es eso posible? Un principio fenomenológico básico, como ya se ha mencionado en el capítulo anterior, es que lo que percibimos no es automático o preordenado sino que depende de lo que tomemos por primer plano y lo que tomemos por segundo plano o fondo. Podríamos decir que lo que percibimos es «leído» como un sistema de señales contra ese fondo. En la percepción común el fondo generalmente no es dado, pero en la ciencia somos capaces de cambiarlo gracias a la tecnología y a instrumentos fiables que nos permiten ver cosas nuevas. Puede ser algo tan sencillo como ver en qué dirección sopla el viento o cuál es la

¹²⁴ Véase Robert P. Crease, *The Play of Nature: Experimentation as Performance*, Indiana University Press, Bloomington, Indiana, 1993; Patrick A. Heelan, *Space-Perception and the Philosophy of Science*, University of California Press, Berkeley, 1983; Don Ihde, *Technology and the Lifeworld*, Indiana University Press, Bloomington, Indiana, 1990.

temperatura haciendo una lectura de una veleta o de un termómetro. Pero también puede ser algo más complejo, como en el caso de ver electrones en una cámara de niebla o varios aspectos de la anatomía en una placa de rayos X. Son cosas que las personas que no son científicas también pueden aprender a hacer. Durante los primeros tiempos de la física de altas energías, antes del advenimiento de los ordenadores, los físicos contrataban amas de casas y estudiantes de humanidades para identificar muones y piones y rastros de otros tipos de partículas. Además, la percepción humana no sólo se desarrolla siempre contra un fondo, sino que está sujeta a educación.

Cada vez que percibimos un objeto, aprehendemos una cierta regularidad o invariancia en su apariencia (o perfil, como gustan de decir los filósofos). Percibir un objeto como una mesa y no como una ilusión, una pieza de escenografía o una escultura, es saber que si camino a su alrededor veré otros lados que ahora no son visibles para mí y que dejaré de ver *este* lado, y que durante todos estos cambios todavía la veré como el «mismo» objeto. Este horizonte implícito de apariencias que «viene con» el acto de ver algo como un objeto no es por mi parte especulación ni conjetura; es lo que significa ver un objeto. Si de golpe me parece ver al presidente de Estados Unidos de pie en la acera de enfrente, lo más probable es que me mueva un poco hacia un lado para obtener un perfil desde otro ángulo que me muestre que el objeto es en realidad parte de un decorado de teatro, en cuyo caso dejaré de verlo como una persona para verlo como una fotografía pegada a un tablón.

Percibir un objeto común o un objeto científico es aprehender un perfil particular del objeto junto con su horizonte de fondos esperados. Esto es así incluso cuando vemos algo tan corriente como una manzana. En cada experiencia sucesiva (recogerla, girarla, morderla) satisfacemos cada vez más su horizonte de perfiles. Podemos llevarnos una sorpresa (la manzana podría resultar ser de madera o de vidrio), pero esto lo percibimos en una experiencia que reconfigura pero no elimina el horizonte de perfiles. Mientras que las invariancias en la percepción común son intuiciones de regularidades físicas, las de los objetos científicos se suelen describir por medio de teorías. Ver un cromosoma, un planeta, una nube de sodio u otro objeto científico es entender ese objeto como algo que obedece ciertas regularidades o invariancias que vienen definidas por la teoría que corresponda en cada caso. Que sigamos viendo esos fenómenos como tales dependerá de que sus perfiles satisfagan las expectativas creadas por esas invariancias¹²⁵.

«Asombro» es el nombre que damos al deseo de explorar los perfiles que nos ofrece y promete un fenómeno por el solo interés de hacerlo, de embarcarse en una aventura para satisfacerlo, y no se observa únicamente en los humanos, sino también en los primates y en otros animales. El asombro es «sin duda algo más que una

¹²⁵ Una importante complicación adicional es que un término científico (por ejemplo, «electrón») puede poseer lo que se denomina «semántica dual», puesto que puede hacer referencia tanto a un término abstracto de una teoría como a una presencia física en un laboratorio (considérese la diferencia, por ejemplo, entre un *do* en una partitura musical y una *do* en una sala de conciertos). Sobre la dualidad semántica en la ciencia, véase Patrick A. Heelan, «After Experiment: Realism and Research», *American Philosophical Quarterly* 26 (1989), pp. 297-308, y Crease, *Play of Nature*, pp. 88-89.

simple construcción social», escribe la filósofa Maxine Sheets-Johnstone; es parte de nuestro linaje evolutivo. El temperamento científico persigue esta aventura por medio de la experimentación, que produce perfiles de fenómenos nuevos y a menudo inesperados. En el caso de la mayoría de los objetos (copas, sillas, incluso personas) sabemos bastante bien qué esperar en el horizonte de perfiles. No obstante, algunas veces tenemos no sólo la conciencia, sino incluso la expectativa de la posibilidad de una sorpresa. A eso lo llamamos «misterio». El temperamento científico implica estar abierto a la posibilidad de ser sorprendido. Esto es sin duda lo que hay tras el comentario de Albert Einstein de que «lo más bonito que podemos experimentar es lo misterioso. Es la fuente de todo arte y toda ciencia auténticos¹²⁶».

En los laboratorios podemos crear fondos, marcos de referencia especiales con la ayuda de tecnología e instrumentos fiables (desde termómetros o aparatos de rayos X o de resonancia magnética hasta complejos detectores de partículas) en los que se manifiestan ante nosotros cosas nuevas. El aparato de Millikan es un ejemplo. En su interior había un mundo particular con el que el científico estadounidense llegó a familiarizarse íntimamente. Conocía sus leyes y perturbaciones. Reconocía los comportamientos y situaciones típicos de ese mundo y, por tanto, también los atípicos, cuando sabía que no entendía todo lo que pasaba. Por esta razón, puede decirse que podía *ver* cosas en ese mundo.

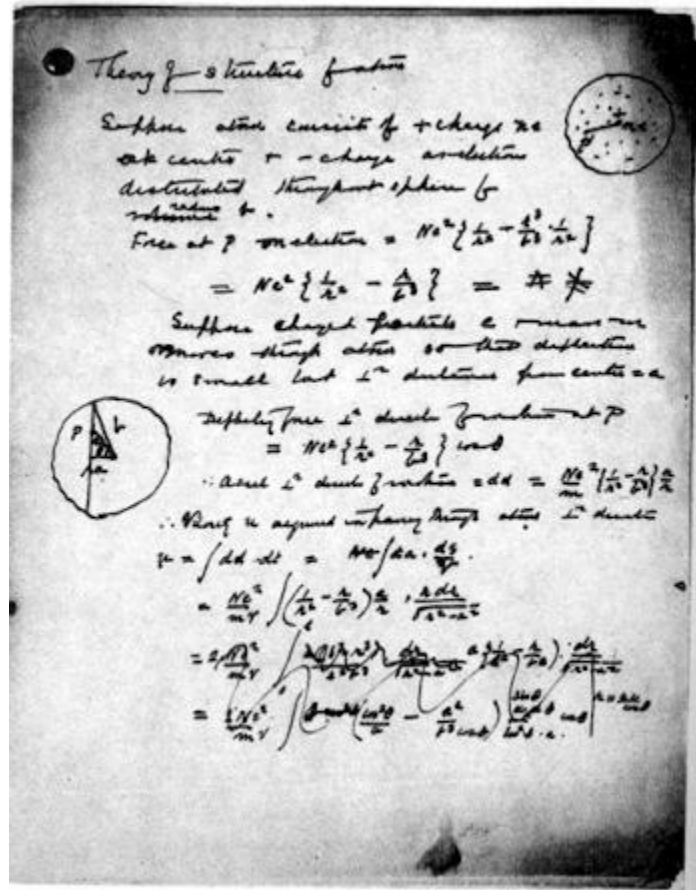
¹²⁶ Albert Einstein, en Clifton Fadiman (ed.), *Living Philosophies*, Doubleday, Nueva York, 1990, p. 6

Este tipo de familiaridad es el que tienen científicos como McClintock o Millikan con sus objetos de estudio: la capacidad de aprehender el mundo con el que trabajan hasta el punto de ver objetos en él es sin duda una precondition para encontrar en él también la belleza.

Capítulo 9

El amanecer de la belleza

Rutherford y el descubrimiento del núcleo atómico



Primera anotación de Rutherford de su teoría de la estructura del átomo, escrita probablemente en el invierno de 1910-1911.

Durante la primera década del siglo XX, un ingenioso experimento permitió al físico británico Ernest Rutherford (1871-1937) descubrir la estructura interna del átomo. Para sorpresa de los científicos, lo que averiguó fue que los átomos están constituidos por un núcleo central con carga positiva, en el que reside prácticamente toda la masa del átomo, y a su alrededor una nube de electrones con carga

negativa. Hasta ese momento, la estructura última de la materia era uno de esos misterios —como el principio (y el fin) del universo, el origen de la vida y la existencia de vida en otros planetas— que son material interesante para la especulación pero imposible para la investigación. ¿Cómo se puede estudiar la estructura interna de los átomos si los únicos instrumentos disponibles están hechos de átomos?, se preguntaban los científicos. Era como intentar averiguar qué hay en el interior de una bola de goma... con otra bola de goma. El logro de Rutherford marcó el nacimiento de la moderna física de partículas.

El camino que llevó al descubrimiento de Rutherford fue todo menos recto. Para empezar, su intención no era descubrir la estructura interna del átomo. De entrada, le llevó tiempo darse cuenta de que disponía de una herramienta útil para realizar ese experimento, luego hubo de averiguar la manera correcta de utilizarla y, por último, entender qué era lo que le decía el experimento. Entonces llevó tiempo que otros llegaran a convencerse¹²⁷.

Rutherford era un hombre corpulento y de aspecto seguro, de una cara rubicunda adornada por un poblado mostacho, risa sonora y voz estentórea que nunca dejaba de insistir a sus ayudantes y colaboradores para que mantuvieran las cosas simples. Para explicar sus éxitos, solía decir, «soy un firme creyente en la sencillez, pues yo mismo soy una persona sencilla¹²⁸». Presunción:

¹²⁷ El artículo clásico sobre este experimento es J. L. Heilbron, «The Scattering of α and β Particles and Rutherford's Atom», *Archive for History of Exact Sciences* 4 (1967), pp. 247-307.

¹²⁸ M. Oliphant, *Rutherford: Recollections of the Cambridge Days*, Elsevier, Amsterdam, 1972, p. 26.

conocía el poder de los aparatos simples para hacer que la naturaleza le revelara sus más profundos secretos.

Es precisamente por su sencillez, profundidad y por lo definitivo de sus resultados por lo que los experimentos de Rutherford se cuentan entre los más bellos de la ciencia. Su colega y a veces competidor J. G. Crowther escribió en una ocasión que le sorprendía que las sencillas ideas plasmadas en los experimentos de Rutherford resultaran eficaces en el siglo XX: «Cabría esperar que después de tres siglos de intenso desarrollo de la física, las ideas hubieran evolucionado necesariamente hacia una complejidad sutil y que todas las ideas simples estuvieran ya usadas y agotadas¹²⁹». Y, según otro de sus colegas, A. S. Russell, «Con la perspectiva del tiempo uno podía apreciar la belleza del método de investigación y la facilidad con la que permitía alcanzar la verdad. La mínima complicación iba mano con mano con la mínima posibilidad de error. Por decirlo de algún modo, Rutherford conseguía con un solo movimiento y a distancia enhebrar la aguja a la primera¹³⁰».

El británico nunca demostró un gran aprecio por el arte. En cuanto a su talento musical, cuando se lanzaba a cantar su elección «solía ser una versión desentonada de *Onward Christian Soldiers* interpretada con entusiasmo¹³¹». Sin embargo, su método para sacar a la luz la estructura interna del mundo tenía todas las marcas del buen artista: feroz energía, profundo respeto por el

¹²⁹ J. G. Crowther, *British Scientists of the Twentieth Century*, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1952, p. 44.

¹³⁰ A. S. Russell, «Lord Rutherford: Manchester, 1907-1919: A Partial Portrait», *Proceedings of the Physical Society* 64 (1 de marzo de 1951), p. 220.

¹³¹ Oliphant, *op. cit.*, p. 123.

material y poderosa imaginación física. El propio Rutherford afirmó en una ocasión que «el proceso de descubrir puede considerarse como una forma de arte¹³²».

Como en el arte, en la ciencia el proceso creativo a menudo es enrevesado y plagado de retrocesos. No es raro que sea sólo al final cuando el artista descubre lo que estaba buscando. Así fue con la obra maestra de Rutherford, el descubrimiento del núcleo atómico.

Nació en Nueva Zelanda y de joven gustaba de entretenerse con cámaras, relojes y pequeños modelos de noria en el molino de su padre. En 1895 obtuvo una beca especial que lo llevó a Inglaterra y al laboratorio Cavendish, el que el historiador J. L. Heilbron ha llamado «vivero de la física nuclear¹³³». Llegó allí al principio de una época emocionante para la física y exigente para los físicos: el alemán Wilhelm Röntgen había descubierto los rayos X en 1895, el francés Henri Becquerel había descubierto la radiactividad en el uranio en 1896 y el inglés J. J. Thomson, el director del laboratorio Cavendish, había descubierto el electrón en 1897.

Rutherford no tardó en destacar en esta intensa atmósfera, y en 1898 dejó el «vivero» tras serle ofrecida una plaza en la Universidad McGill de Montreal, donde permanecería hasta 1907. Justo antes de trasladarse, mientras investigaba la radiactividad, realizó el inesperado y crucial descubrimiento de que el uranio emite dos tipos distintos de radiación. Muy a su estilo, diseñó un experimento simple y absolutamente convincente para demostrarlo: cubrió uranio con varias capas de papel de aluminio y midió la cantidad de

¹³² Citado en *ibid.*, p. 65.

¹³³ J. L. Heilbron, «An Era at the Cavendish», *Science* 145, 24 de agosto de 1964, p. 825.

radiación que las atravesaba. Con una o dos capas se reducía el nivel de radiactividad, pero con tres capas caía de golpe. Pero lo más curioso era que la radiación restante no quedaba significativamente bloqueada por una cuarta o una quinta capa. Seguía atravesando aunque el uranio estuviera cubierto por muchas capas de aluminio. Para Rutherford, esto demostraba que el uranio emitía dos tipos de radiación, una de las cuales era notablemente más potente que la otra. Usando las dos primeras letras del alfabeto griego, llamó al tipo menos penetrante «rayos alfa», y al más penetrante, «rayos beta».

Los rayos alfa habrían de convertirse en su foco de investigación: qué eran, cómo se comportaban y cómo podían utilizarse. Los estudiantes de Rutherford solían decir que la partícula alfa era una pequeña criatura que su mentor había creado por accidente y luego había hecho suya. Juntos, Rutherford y esta criatura obraban maravillas. Habría de convertirse en la herramienta que le permitiría desentrañar la naturaleza del átomo, aunque eso es algo que descubriría, también, por accidente.

Rutherford no tardó en descubrir que ni las partículas alfa ni las beta eran realmente rayos en el sentido en que lo eran, por ejemplo, los rayos X. Eran fragmentos diminutos de materia con carga eléctrica que los átomos de uranio emitían por razones desconocidas. Los rayos beta tenían carga negativa, y pronto se descubrió que eran electrones, pero la naturaleza de los rayos alfa, que tenían carga positiva, era al principio un enigma. Rutherford lo resolvió. Había notado que su masa era parecida a la de los átomos

de helio, pero ¿eran átomos de helio? Para comprobarlo concibió otro experimento simple e ingenioso. Le pidió a un soplador de vidrio que le hiciera un tubo con las paredes lo bastante finas como para permitir que la atravesaran los rayos alfa, pero lo bastante fuertes como para no deformarse bajo la presión de la atmósfera. Llenó este tubo con radón, un elemento gaseoso que sabía que emitía rayos alfa, y lo insertó en otro tubo de vidrio cerrado herméticamente, dejando entre ambos un espacio del que bombeó el aire para hacer el vacío. Lo único que podía entrar en ese espacio eran los rayos alfa que atravesaban la pared del tubo del interior. Rutherford descubrió que en ese espacio se acumulaba lentamente un gas a una velocidad proporcional a la tasa con la que las partículas alfa atravesaban la pared interior. Analizó el gas y descubrió que era helio. Los rayos alfa, o más bien partículas alfa, como se las denominaba cada vez más a menudo, eran átomos de helio. «Este experimento», escribió el estudiante de Rutherford Mark Oliphant, «despertó un gran interés a causa de su simplicidad y belleza¹³⁴».

Pero aún quedaban misterios por resolver. ¿De qué modo se convertían en helio, que normalmente tiene carga neutra, unas partículas alfa de carga positiva? Y ¿qué hacían unas partículas de helio en el interior de unos átomos de uranio? ¿Eran fragmentos desprendidos de un bloque atómico o qué eran? ¿De qué modo se relacionaban con el resto del núcleo del átomo? El camino que siguió Rutherford para dar respuesta a este rompecabezas fue

¹³⁴ Oliphant, *op. cit.*, p. 11.

indirecto. Comenzó con una disputa amistosa con Becquerel, quien había realizado algunos experimentos con partículas alfa que no cuadraban con los resultados obtenidos por el de Nueva Zelanda. Tras percatarse de este desacuerdo, los dos científicos resolvieron examinar la cuestión con más detalle, y Rutherford al final llevó la razón. Aun así, la disputa había despertado su curiosidad: ¿por qué era tan endiabladamente difícil medir las propiedades de las partículas alfa? ¿Cómo se podía haber equivocado Becquerel, cuando sabía que era un científico cuidadoso? La razón estaba en la costumbre de las partículas alfa de rebotar en las moléculas del aire.

Rutherford conocía este comportamiento y lo había demostrado con su habitual estilo simple y directo: primero disparó un haz de partículas alfa contra una placa fotográfica en el vacío, produciendo una mancha brillante y bien definida en el lugar del impacto. Luego disparó el mismo haz contra la misma placa, pero esta vez no en el vacío sino a través del aire. En esta ocasión la mancha creada era dispersa y borrosa. Ésta aparecía difuminada, según escribió Rutherford en 1906, debido a «la dispersión de los rayos» al rebotar contra las moléculas del aire. Aunque Rutherford todavía no lo sabía, el descubrimiento del papel de la dispersión habría de convertirse en un paso clave en el camino hacia el descubrimiento del núcleo.

Dos años más tarde, Rutherford fue galardonado con el premio Nobel por sus «investigaciones sobre la desintegración de los elementos y la química de las sustancias radiactivas».

Curiosamente, le dieron el premio de química y no el de física. Durante la ceremonia, bromeó con que había visto muchas transformaciones en su trabajo, pero la más rápida había sido la suya propia de físico a químico. Para entonces se había trasladado de nuevo a Inglaterra, a la Universidad de Manchester. A medida que crecía su interés por la medición precisa de las distintas propiedades de las partículas alfa, crecía su frustración con la dispersión. Ésta afectaba gravemente, por ejemplo, a sus intentos de medir la carga de las partículas alfa por el método de dispararlas una a una contra un detector. Sus colegas también estaban frustrados por la dispersión, y W. H. Bragg le envió algunos dibujos de trayectorias «con codos» que las partículas alfa habían dejado en una cámara de niebla. «Esta dispersión es el demonio», se quejó Rutherford en una carta a otro colega.

Exasperado, Rutherford pidió que midiera la dispersión a su ayudante, Hans Geiger, el que más tarde inventaría el famoso contador Geiger, un detector de radiactividad por medios electrónicos usado en laboratorios y en innumerables películas de suspense de la posguerra. Tenemos aquí un ejemplo más de la vigilancia del experimentador, el mismo instinto que había conducido a Cavendish a medir la fuerza de los campos magnéticos y a Millikan a estudiar la evaporación de las gotas de agua. Si se detecta una fuerza perturbadora en un experimento, lo primero es medirla directamente; lo segundo, compensarla. La solicitud de Rutherford a Geiger resultó ser otro paso fundamental en el camino hacia el descubrimiento del núcleo atómico, aunque Rutherford

tampoco se dio cuenta de ello al principio. Simplemente le parecía que debía entender y cuantificar una perturbación que introducía ruido en sus mediciones de la carga y masa de las partículas alfa.

Medir las partículas alfa era una tarea pesada. Rutherford sabía que cuando las partículas alfa chocan contra ciertas sustancias químicas, por ejemplo el sulfuro de cinc fosforescente, producen unos diminutos destellos momentáneos conocidos como «centelleos», que pueden observarse bajo el microscopio. Era la primera vez que se detectaban visualmente átomos individuales (las partículas alfa contaban como átomos de helio). Observando pantallas pintadas con esas sustancias químicas, los científicos podían contar los lugares donde las partículas alfa chocaban con la pantalla, y esto les proporcionaba información sobre sus trayectorias. Pero para observar los débiles y efímeros centelleos, Geiger tenía que sentarse a oscuras durante al menos quince minutos para ajustar su visión antes de poder ver los destellos. Era un trabajo tedioso y que ocupaba demasiado tiempo.

El aparato que Geiger utilizó para medir la dispersión era simple comparado con los actuales. En un pequeño cesto metálico se introducía una fuente de radio, un elemento muy radiactivo que emitía una corriente casi continua de partículas alfa. El cesto tenía unas hendiduras de manera que por ellas pasaran haces estrechos de partículas alfa hacia un tubo de unos 1,2 metros de largo en el que se había practicado el vacío para asegurarse de que, al atravesarlo, las partículas alfa no fueran dispersadas por las moléculas del aire. Conectado a este tubo de disparo había otro

tubo parecido, también sin aire, por el que pasaban las partículas alfa antes de topar con una pantalla de sulfuro de cinc. Mirando por un microscopio enfocado en la pantalla, Geiger podía observar los destellos y medir sus posiciones. De forma casi invariable, estos destellos se producían en el mismo lugar. Pero cuando Geiger colocaba unas finas hojas de metal entre el primer tubo de vidrio y el segundo, los destellos dejaban de aparecer todos en el mismo lugar, y algunos aparecían dispersos por la pantalla.

Geiger ofreció una explicación de lo que sucedía en una ponencia presentada en la Real Sociedad en junio de 1908. La mayor parte de las partículas alfa atravesaban sin problemas la hoja de metal, pero de vez en cuando alguna de las partículas era dispersada. Era como si la partícula alfa saliera desviada de modo análogo a como, en una mesa de billar, una bola sale desviada cuando la roza la bola blanca. Cuanto más gruesa era la hoja de metal, mayor era el número de partículas alfa dispersadas y mayor el ángulo de desviación. Parecía obvio que estas partículas alfa debían haber colisionado con varios átomos al atravesar la hoja más gruesa. Además, las hojas de metal fabricadas con un elemento pesado, como el oro, dispersaban más las partículas alfa que las hojas de un elemento más ligero, como el aluminio.

Para Rutherford y sus colaboradores resultaba difícil imaginar qué era lo que ocurría durante la dispersión. Las partículas alfa, como bien sabían, salían disparadas del radio con una gran velocidad, del orden de 16.000 kilómetros por segundo. Era difícil imaginar de qué modo los átomos de una fina hoja de metal podían desviar unas

entidades tan energéticas. De hecho, Rutherford y sus colaboradores todavía no tenían la imagen moderna de las partículas alfa como bolas de billar o balas; todo lo que sabían era que eran en esencia átomos, átomos de helio para más señas, pero de su estructura interna no sabían absolutamente nada. El descubrimiento de que algunos átomos emitían partículas alfa con carga positiva y partículas beta con carga negativa había incitado a unos pocos científicos a pensar en la estructura interna de los átomos (y, entre ellos, las partículas alfa o átomos de helio). Los átomos sin duda contenían electrones, y puesto que los átomos por lo común eran eléctricamente neutros, debían contener también una carga positiva. Pero ¿cómo?, ¿y en qué forma? En 1904, J. J. Thomson había propuesto que el átomo consistía en una serie de electrones que una especie de gelatina de carga positiva mantenía unidos; algo así como las ciruelas en un pudín, según se dijo entonces, por lo que esta imagen de los átomos dio en conocerse como modelo del pudín. Ese mismo año, un científico japonés propuso un modelo planetario del átomo según el cual éste consistía en un núcleo central con unos satélites a su alrededor. Pero como ninguno de estos modelos pasaba de ser una conjetura, era difícil imaginar qué ocurría cuando una partícula alfa/átomo de helio hacía carambola con un átomo de otro tipo.

Empeñado en comprender la dispersión, Geiger siguió trabajando con la ayuda de un estudiante procedente de Nueva Zelanda llamado Ernest Marsden. Durante el otoño de 1908 y la primavera de 1909, Geiger y Marsden mejoraron su aparato; insertaron una

especie de juntas para reducir el número de partículas que se dispersaban por las paredes del tubo y utilizaron un haz más intenso, pero aun así no consiguieron obtener buenas mediciones. El problema parecía radicar en que las partículas alfa no eran desviadas únicamente por la hoja de metal, sino también por residuos de aire en el interior de los tubos y por diversas partes del tubo y del resto del instrumento. Con tanto rebote, se hacía difícil discriminar qué dispersaba a qué.

Un buen día de la primavera de 1909, Rutherford, que había seguido el trabajo de Geiger y Marsden y sus crecientes tribulaciones, entró en su laboratorio y, según recuerda Marsden, dijo, «A ver si podéis ver algún efecto de partículas alfa reflejadas directamente de una superficie de metal». Rutherford quería que rediseñaran el experimento para ver si las partículas alfa podían rebotar directamente de la hoja de metal, como una pelota de frontón rebota de la pared, en lugar de ser dispersadas al atravesarla. Una vez más, Geiger y Marsden dieron con un diseño experimental sencillo. Movieron la pantalla a un lado y la protegieron con una placa de plomo para bloquear todas las partículas alfa en dirección a la pantalla salvo aquellas que hubieran rebotado en la hoja de metal (figura 9.1). Tuvieron que aumentar la intensidad de la fuente para maximizar el número de partículas que rebotaban con un ángulo grande. Casi de inmediato descubrieron que, en efecto, algunas partículas rebotaban hacia un lado. Tras varias semanas de experimentación usando distintos metales y hojas de distinto grosor, encontraron que

aproximadamente una de cada ocho mil partículas era reflejada con un ángulo de más de 90° . «Al principio», escribió Geiger años más tarde, «no podíamos entenderlo [la dispersión de gran ángulo] en absoluto¹³⁵».

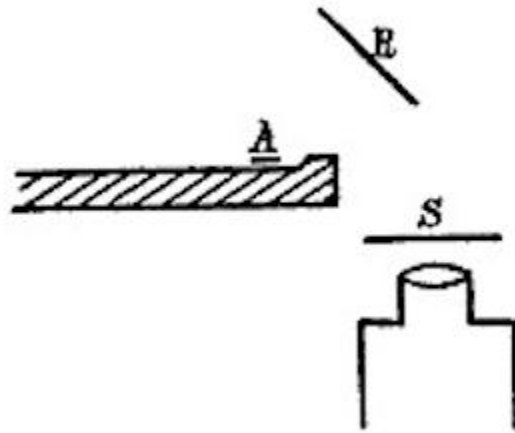


Figura 9.1. Esbozo del diseño experimental de Geiger y Marsden para medir la dispersión de gran ángulo.

Llegados a este punto, Rutherford comprendió que, mal que le pesara, si las partículas alfa eran dispersadas por colisiones aleatorias con átomos, para entender este proceso tendría que aprender mucho más sobre la matemática de la probabilidad de lo que entonces sabía. Así pues, a principios de 1909 Rutherford se apuntó a un curso introductorio de probabilidad. El premio Nobel tomó apuntes e hizo los ejercicios con diligencia hasta que logró esbozar una teoría de lo que él llamaba «dispersión múltiple», que se aplicaba a los casos en los que las partículas eran dispersadas por

¹³⁵ Citado en D. Wilson, *Rutherford: Simple Genius*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1983, p. 290.

encuentros aleatorios con varios átomos, cada uno de los cuales desviaba las partículas en un pequeño grado. Pero la teoría de la dispersión múltiple no se ajustaba bien a la dispersión de gran ángulo que Geiger y Marsden habían encontrado.

En una conferencia pronunciada hacia el final de su vida, Rutherford habló del tiempo en que Geiger y Marsden comenzaron a montar su experimento:

Recuerdo que dos o tres días después Geiger vino a verme muy excitado y me dijo, «Hemos logrado captar algunas de las partículas alfa que rebotan hacia atrás...». Fue uno de los acontecimientos más increíbles que me han pasado en toda la vida. Aquello era casi tan increíble como si uno disparara contra un pañuelo de papel y la bala rebotara y nos diera.¹³⁶

La incredulidad de Rutherford es un caso de juicio retrospectivo del experimentador. En términos físicos, era realmente increíble que una pesada partícula alfa, disparada a una velocidad de unos dieciséis mil kilómetros por segundo, ¡rebotara en una delgada hoja de metal! Pero ni siquiera la prodigiosa imaginación física del británico podía haber comprendido realmente lo increíble que era.

Al principio siguió aferrado a su idea de que la dispersión de gran ángulo se podía explicar por dispersión múltiple, es decir, por colisión de las partículas alfa con un gran número de átomos hasta que algunas acaban rebotando. Pero a lo largo del siguiente año, mientras estudiaba la teoría de la probabilidad, digería los

¹³⁶ E. N. da C. Andrade, *Rutherford and the Nature of the Atom*, Doubleday, Nueva York, 1964, p. 111.

resultados de su experimento y desarrollaba sus ideas, su manera de pensar comenzó a cambiar. Uno de esos desarrollos fue su creciente convicción de que una partícula alfa no era una pella o pudín, sino que podía concebirse como si fuera un punto. Éste fue un gran paso, puesto que, entre otras cosas, simplificaba enormemente el tratamiento matemático de la teoría. También le ayudó a percatarse de lo útil que podía ser la dispersión de las partículas alfa. Sabiendo lo suficiente sobre ella y sobre cómo se ve afectada por diversos parámetros, se podría invertir el proceso y, a partir del modo en que se dispersan las partículas alfa, obtener información sobre el medio que produce la dispersión. Por consiguiente, la dispersión no era un efecto indeseable con el que tenían que convivir los experimentadores, sino un interesante fenómeno que podía decirnos algo sobre otras cosas.

En particular, Rutherford comenzaba a darse cuenta de que la dispersión de las partículas alfa podía decirle algo sobre la estructura del propio átomo. Según Geiger, Rutherford tuvo una idea reveladora y fundamental poco antes de la Navidad de 1910.

Un día Rutherford entró en mi despacho de muy buen humor y me dijo que por fin sabía qué aspecto tenía el átomo y cómo explicar las grandes desviaciones de las partículas alfa. Ese mismo día comencé un experimento para poner a prueba las relaciones que esperaba Rutherford entre el número de partículas dispersas y el ángulo de dispersión.¹³⁷

¹³⁷ Citado en Wilson, *op. cit.*, p. 296.

Y uno de los invitados a las comidas que el premio Nobel ofrecía los domingos, Charles G. Darwin, recuerda cómo un entusiasmado Rutherford le decía que «es realmente maravilloso ver demostrado en la práctica lo que uno ha visto con la imaginación¹³⁸».

Las simplificaciones de la teoría de la dispersión habían ayudado al físico británico a comprender que las partículas alfa no se podían explicar por dispersión múltiple, que no acababan rebotando tras muchas colisiones sino a causa de una única colisión. Esto, a su vez, sólo podía ocurrir si la mayor parte de la masa del átomo estuviera concentrada en un único nódulo central con carga eléctrica.

Lo que Rutherford vio en su imaginación fue que el átomo consistía en un núcleo de gran masa con carga eléctrica rodeado por un espacio prácticamente vacío, más vacío incluso que el sistema solar. Si ampliáramos un átomo hasta alcanzar el tamaño de un campo de fútbol, el núcleo tendría el tamaño de una mosca posada en su centro y alrededor del recinto se moverían unos electrones todavía más pequeños, como unas motas de polvo. La práctica totalidad de la masa del estadio estaría contenida en ese diminuto núcleo. No obstante, Rutherford todavía no tenía una idea clara de si tenía carga positiva o negativa. En marzo de 1911 le escribió a un colega: «Geiger está resolviendo la cuestión de la dispersión de gran ángulo y por el momento sus resultados parecen muy prometedores para la teoría. Las leyes de la dispersión de gran ángulo son completamente distintas de las de la dispersión de pequeño ángulo... Comienzo a

¹³⁸ Citado en A. S. Eve, *Rutherford*, Macmillan, Nueva York, 1939, p. 199.

pensar que el núcleo central tiene carga negativa¹³⁹». Obviamente estaba pensando que las partículas alfa, de carga positiva, viraban alrededor del núcleo del mismo modo que un cometa vira alrededor del Sol.

Pero Rutherford dudaba si publicar sus conclusiones, en parte al menos porque estaban en desacuerdo con el modelo de pudín de su mentor, J. J. Thomson, quien, al fin y al cabo, era el mayor experto mundial en física atómica. Tuvo entonces un golpe de suerte. Uno de los estudiantes de Thomson, J. G. Crowther, publicó un experimento con partículas beta que afirmaba demostrar que «la electricidad positiva del interior del átomo... se encuentra distribuida con bastante uniformidad por todo el átomo¹⁴⁰». Esto liberó a Rutherford del conflicto edípico que hubiera supuesto atacar de frente a su mentor. Ahora podía entrar de lleno en la refriega y criticar a Crowther y sus conclusiones mientras mantenía una relación cálida con Thomson.

En una charla informal pronunciada en Manchester en marzo de 1911, Rutherford hizo referencia a los resultados y conclusiones de Crowther, y a renglón seguido comentó el descubrimiento de Geiger y Marsden de que la dispersión de gran ángulo «no se podía explicar» por la teoría de la dispersión múltiple. Y añadió: «Parece claro que las grandes desviaciones de las partículas alfa están producidas por una sola colisión atómica». Esto implicaba, a su vez, que el átomo «consiste en una carga eléctrica central concentrada

¹³⁹ Citado en *ibid.*, pp. 194-195.

¹⁴⁰ J. G. Crowther, «On the Scattering of Homogeneous Rays and the Number of Electrons in the Atom», *Proceedings of the Royal Society of London* 84 (1910-1911), p. 247.

en un punto». Rutherford siguió echando tierra sobre las conclusiones de Crowther añadiendo que su modelo podía explicar además todos los resultados experimentales de éste¹⁴¹.

Ese mismo mayo, Rutherford envió a una revista científica «un artículo bello y famoso», según la descripción que de él ha hecho Heilbron. Su título es «The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom» («Dispersión de las partículas α y β por la materia y la estructura de los átomos¹⁴²). Tras describir las investigaciones de Geiger y Marsden, la teoría de la dispersión sencilla y múltiple y el experimento de Crowther, Rutherford dedica una sección a «Consideraciones generales». En esta presentación formal escribe: «Tras tomar en consideración toda la evidencia, lo más simple es suponer que el átomo contiene una carga central distribuida por un volumen muy pequeño». Este escrito científico, uno de los más importantes artículos fundacionales de todos los tiempos, provocó, en palabras de un colaborador de Rutherford, E. N. da C. Andrade, «el cambio más radical en nuestra concepción de la materia desde los tiempos de Demócrito... cuatrocientos años antes de Cristo». Los átomos se consideraban las piezas básicas de la materia (la propia palabra «átomo» significa «indivisible» en griego), pero Rutherford presentaba una descripción de sus partes y estructura.

Al proporcionar una imagen de la estructura del átomo, el modelo de Rutherford abrió el camino a la resolución de muchos problemas

¹⁴¹ E. Rutherford, «The Scattering of α and β Rays and the Structure of the Atom», *Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society*, series 4, 55, n. 1 (marzo de 1911), p. 18.

¹⁴² E. Rutherford, «The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom», *Philosophical Magazine* (mayo de 1911), pp. 669-688.

de la física atómica. Las partículas alfa, por ejemplo, eran en realidad fragmentos del núcleo que de algún modo habían sido expulsados o se habían desprendido y tenían, como el resto del núcleo, carga eléctrica positiva hasta que su velocidad disminuía lo bastante como para poder atraer electrones, quedando entonces con carga neutra como todos los átomos de helio.

No obstante, ni Rutherford ni nadie en su tiempo parece haber visto en este descubrimiento un hito tan extraordinario. Rutherford no alardeó de su descubrimiento en su correspondencia y sólo hace dos breves referencias a su artículo en un libro que publicó casi dos años más tarde, *Radioactive Substances and Their Radiations* (*Sustancias radiactivas y sus radiaciones*). El resto del mundo científico se mostró igualmente desapasionado. No se encuentra ninguna referencia al artículo de Rutherford en las principales revistas científicas de la época ni en las actas de los principales congresos científicos ni en las conferencias pronunciadas por los más eminentes científicos, J. J. Thomson incluido.

A los habitantes del siglo XXI, dolorosamente conscientes como somos de la dramática historia que posteriormente ha envuelto al núcleo atómico, esto nos desconcierta. Pero por aquel entonces el modelo de Rutherford aún no se había conectado con la ingente cantidad de información que los químicos y físicos habían acumulado sobre el átomo. De hecho, en sentido estricto el modelo no funcionaba, puesto que, de acuerdo con lo que entonces se sabía, era mecánicamente inestable. Sólo se convirtió en un modelo estable cuando el físico danés Niels Bohr llegó a Cambridge en 1912

y aplicó al modelo de Rutherford la idea del cuanto, la idea de que, en los niveles más bajos, la energía no se presenta en cualquier cantidad sino en paquetes de tamaño definido. No sólo eso, sino que Bohr demostró que todo el modelo revisado a la luz de la teoría cuántica explicaba muchas más cosas, por ejemplo las frecuencias de emisión de luz por los átomos de hidrógeno. Aún más tarde, otro estudiante de Rutherford, Harry Moseley, demostró que el modelo de átomo de Rutherford-Bohr explicaba las frecuencias a las que emiten rayos X los electrones más interiores de los elementos. Fue sólo entonces cuando el núcleo del átomo se hizo obvio para quienes no estaban dotados de una imaginación física tan poderosa como la de Rutherford.

En la actualidad resulta fácil explicar retrospectivamente el experimento de Rutherford, como él mismo había hecho, como si su descubrimiento hubiera sido el resultado de un momento ¡eureka! Los libros de texto de física comparan el experimento con la manera como los antiguos inspectores de aduana comprobaban si las balas de heno llevaban contrabando escondido: disparaban contra ellas para ver si alguna bala rebotaba contra algo duro oculto en su interior. Pero cuando Rutherford y sus ayudantes se embarcaron en este experimento no estaba claro siquiera que las partículas alfa fueran como balas, y mucho menos qué podía hacerlas rebotar y de qué modo. Todas estas ideas fueron surgiendo al tiempo que nacía el experimento, no antes. Y no fue hasta mucho tiempo después de concluido cuando se hizo evidente que el descubrimiento de Rutherford y su equipo iba a marcar una época.

Interludio

El arte de hacer ciencia

En una ocasión ideé un plan para repetir el experimento que había llevado a Rutherford a descubrir el núcleo atómico. En la práctica parecía bastante sencillo: una fuente, una diana, unas pantallas de centelleo, unos pequeños destellos que podían contarse en la oscuridad. Me había tomado la molestia de buscar fotografías y esquemas del experimento, descripciones escritas por los distintos participantes y análisis realizados por los historiadores. Incluso refresqué mis conocimientos de matemáticas. Imaginaba poder ejecutar el experimento para un público de estudiantes, quizá mediante un vídeo o un documental. Para ayudarme en mi trabajo, me puse en contacto con alguien que sabía que había trabajado con Rutherford en los experimentos sobre la dispersión de partículas alfa, el físico Samuel Devons del Barnard College. Me acerqué hasta su despacho dispuesto a esbozar un plan.

Mi sugerencia hizo que Devons, literalmente, estallara a carcajadas. Y durante mucho tiempo. Cuando por fin logró calmarse, me explicó que en la actualidad era prácticamente imposible obtener los permisos para trabajar con material radiactivo de la potencia requerida. Se podía hacer un poco de trampa, dijo, y hacer lo que hacen a veces los laboratorios de las universidades: usar fuentes débiles pero permitidas y equipos electrónicos modernos que se pueden dejar en marcha durante horas o días recogiendo datos.

Pero obviamente no era eso lo que yo tenía en mente. Entonces me dijo:

Pero el principal problema es que un experimento es una obra de artesanía, como fabricar un viejo violín. Un violín es un chisme muy complejo. Supón que vas a un fabricante de violines y le dices, «¿Podrías ayudarme a fabricar un Stradivarius? Me interesa la fabricación de violines y me gustaría ver cómo se hace». Se reiría de ti como lo he hecho yo. Porque la artesanía es un conocimiento que se lleva en la punta de los dedos, en pequeños trucos que se aprenden cuando se hace algo y no funciona y se vuelve a hacer. Tienes pequeños reveses y piensas en cómo podrías solucionarlos. Y entonces das con la manera de hacerlo. Cada vez que el experimento cambia, olvidas las viejas técnicas y aprendes otras nuevas. Y tienes que sabértelas, porque cuando se lleva un equipo experimental hasta el límite es muy fácil obtener resultados espurios. Estás siempre rascando la superficie y no sabes qué es lo que has hecho mal. Todos los experimentadores han cometido algún error terrible en algún momento y saben de casos de amigos que se han maldecido porque obtuvieron resultados espurios y se dieron demasiada prisa en publicar. Y, sin embargo, tienes que llevar todo lo que sabes hasta el límite. Si no, alguien lo hará antes que tú. Y eso, que le ganen a uno, es horrible. Quien más quien menos tiene un armario lleno de descubrimientos frustrados por haber sido demasiado cauto o porque otro fue más listo. Había un grupo de austríacos trabajando en lo

*mismo que Rutherford más o menos al mismo tiempo y hoy nadie se acuerda de ellos. ¿Por qué? Rutherford fue más osado y más hábil.*¹⁴³

El tipo de conocimiento de oficio que Devons describe no se limita a la física, como es obvio. Albert E. Whitford, un influyente astrónomo estadounidense de mediados del siglo XX, comentó en una ocasión que, en su tiempo, el uso de un gran telescopio era «un arte casi autodidacta. Había que alcanzar una verdadera maestría en el uso de ese bello e irascible instrumento, el gran telescopio». Sin duda, hacerse con todos los detalles de la máquina era todo un reto. «Mirar por un telescopio, aun en las mejores condiciones, es tedioso», dice Allan R. Sandage, un influyente cosmólogo que ha pasado muchas noches recogiendo datos con grandes telescopios. «En las peores condiciones, hace frío y se pasa fatal». Pero las largas horas de incomodidad solo con el telescopio bajo el cielo nocturno también producen lo que el historiador Patrick McCray llama «vínculo íntimo entre el científico y la máquina¹⁴⁴»: la comprensión profunda que necesita un experimentador para saber qué es lo que el instrumento revela y lo que no.

Cuando se forma un vínculo así, el resultado es una actuación que puede calificarse de artística¹⁴⁵. Las actuaciones pueden clasificarse en tres grupos: repeticiones mecánicas, actuaciones normalizadas y

¹⁴³ Citado en Robert P. Crease y Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth Century Physics*, Rutgers University Press, New Brunswick, Nueva Jersey, pp. 337-338.

¹⁴⁴ Todas las citas de este párrafo están extraídas de Patrick McCray, «Who Owns the Sky? Astronomers' Postwar Debates over National Telescopes for Optical Astronomy» (artículo inédito).

¹⁴⁵ Robert P. Crease, *The Play of Nature: Experimentation as Performance*, Indiana University Press, Bloomington, Indiana, 1993, pp. 109-111.

actuaciones artísticas. La repetición mecánica es ejemplificada por los CD o las pianolas, que llevan un código de señales que los hacen recrear una pieza de música. Pero esa música, por bella que sea, no es una creación, sino el eco de una creación. Las actuaciones normalizadas, en cambio, implican un mínimo de maestría; unas acciones que sólo pueden ejecutar unas pocas personas con una formación muy especializada se transforman en una práctica que puede ejecutar con éxito un grupo más amplio de personas con menos formación. Éste sería el caso de la técnica quirúrgica de corrección de la miopía con láser. En otro tiempo estaba reservada a unos pocos y caros especialistas; hoy la realizan cadenas enteras de clínicas comerciales.

La actuación artística va más allá del programa normalizado: es una acción realizada en el límite de lo conocido y controlado; es riesgo. Como bien revela el descubrimiento del núcleo atómico por Rutherford, a los objetos científicos es necesario enfocarlos sacándolos del fondo con el que se confunden. El proceso se asemeja en cierto modo a la experiencia de estudiar una ilusión óptica en la que el contorno de un objeto queda oculto por un dibujo complejo. Al principio, los rasgos del objeto se mezclan de forma confusa en una maraña de líneas y formas, produciendo una vaga tensión y desasosiego, pero de repente resituamos la vista y vemos el objeto, un conejo, por ejemplo, en medio de hojas, ramas y hierba. Los objetos científicos a menudo se reconocen por un proceso análogo. Sólo que en el laboratorio ni siquiera estamos seguros de que haya un objeto en medio de la maraña. Además,

nuestros instrumentos producen el dibujo entero: el objeto y la maraña de fondo en medio de la cual tenemos que encontrarlo. En consecuencia, el modo en que escenificamos el experimento puede interferir con nuestra capacidad para reconocer un nuevo fenómeno y es posible que tengamos que alterar el experimento para que pueda aparecer ante nuestros ojos el objeto que estamos buscando. El experimento de Rutherford no sólo ilustra la maestría en plena actuación sino también de qué modo ese arte de la experimentación se normaliza y transforma en una técnica. Los fenómenos científicos pueden seguir una trayectoria desde un efecto recién descubierto (incluso molesto, como era la dispersión para Rutherford) a una técnica de laboratorio y finalmente a una tecnología. Un efecto es una consecuencia característica, instructiva o útil de un fenómeno científico; la dispersión de las partículas alfa es un ejemplo de ello. Cuando un efecto es sensible a algunos parámetros de interés de un sistema, como la dispersión de Rutherford lo era a la distribución de carga y masa, puede convertirse en una técnica porque el efecto se puede utilizar para alterar, analizar o medir esos parámetros. Y siempre es posible que la técnica sufra una nueva mutación para convertirse en tecnología, es decir, para normalizarse hasta el punto de que pueda ser realizada por instrumentos comerciales que actúan como «cajas negras» cuyos principios el usuario no tiene por qué comprender. Éste sería el caso de la piroelectricidad, una propiedad de ciertos cristales, algunos naturales, que producen descargas momentáneas de electricidad de decenas de miles de voltios cuando se comprimen del modo adecuado. El fenómeno hizo

su aparición en un laboratorio a finales de siglo XIX gracias a la maestría experimental de los hermanos Curie, que lo produjeron con un complejo equipo de laboratorio (uno de los hermanos, Pierre, más tarde se casaría con Marie Curie, que habría de convertirse en la primera mujer galardonada con el premio Nobel). Durante la segunda guerra mundial, la piezoelectricidad se había normalizado lo suficiente como para ser utilizada en los detonadores de bombas aéreas. En un paso más de normalización, este fenómeno de laboratorio, otrora exótico, es en la actualidad corriente en los sistemas de ignición de los encendedores eléctricos.

Entonces, ¿por qué se ignora tan a menudo la maestría que requiere la experimentación? Una de las razones de ello es la propia actitud de los científicos, que a menudo se someten a unas normas en exceso exigentes, faltas de sentimiento y, en último término, poco realistas. Por ejemplo, el premio Nobel Leon Lederman, antiguo director del Fermilab, el laboratorio nacional estadounidense de Batavia (estado de Illinois), a menudo se ha reprendido por sus «descubrimientos frustrados» y en una ocasión escribió un artículo sobre lo que más tarde llamó «los grandes que se me escaparon». Lederman contaba entre éstos la vez en que su equipo pasó por alto la evidencia de una importante partícula que seis años más tarde fue descubierta simultáneamente por otros dos equipos de científicos. «Nuestra concepción», escribió, «[y] nuestra comprensión de los elementos cruciales de la física eran borrosas». Sin embargo, el trabajo del equipo de Lederman era considerado de máximo nivel por sus colegas; de hecho, los dos equipos que acabaron

descubriendo la partícula, que hoy se llama «J/psi», se guiaron por sus investigaciones previas. Cuando conocí a este físico neoyorquino, le pregunté si realmente creía que le había faltado una comprensión más sólida de la física en aquel experimento. «No era lo bastante sólida», me contestó. «Pero el experimento fue y es considerado maravilloso por sus colegas», le dije. «No lo bastante maravilloso», replicó. «Si lo hubiera sido un poco más, habiéramos encontrado la J/psi. Debería haber sido lo bastante listo como para usar detectores de grano fino». Cuando le recordé que había utilizado materiales gruesos que impedían el uso de ese tipo de detector, Lederman sacudió su cabeza con obstinación. «Debería haber sido lo bastante listo como para quitar los materiales gruesos y poner los finos». «Pero», protesté, «eso hubiera significado cambiar los objetivos científicos y la estructura física del experimento sobre una base más bien especulativa». Lederman se mantuvo en sus trece. «Si hubiera sido más listo», dijo amargamente, «hubiera empezado el experimento otra vez desde cero. Pero no lo hice. Fui tonto¹⁴⁶».

¿Por qué Lederman y otros científicos suelen adoptar una actitud de desaprobación hacia sus propios esfuerzos en lugar de aceptar que en la experimentación hay mucho de arte y pericia y que, por tanto, en potencia es falible? Su actitud, hija de una convención que define «lo que hay que tener» en la ciencia, atribuye el fracaso a fallos de planificación y de juicio y niega los riesgos y la incertidumbre inherentes a las investigaciones experimentales. Pero es también

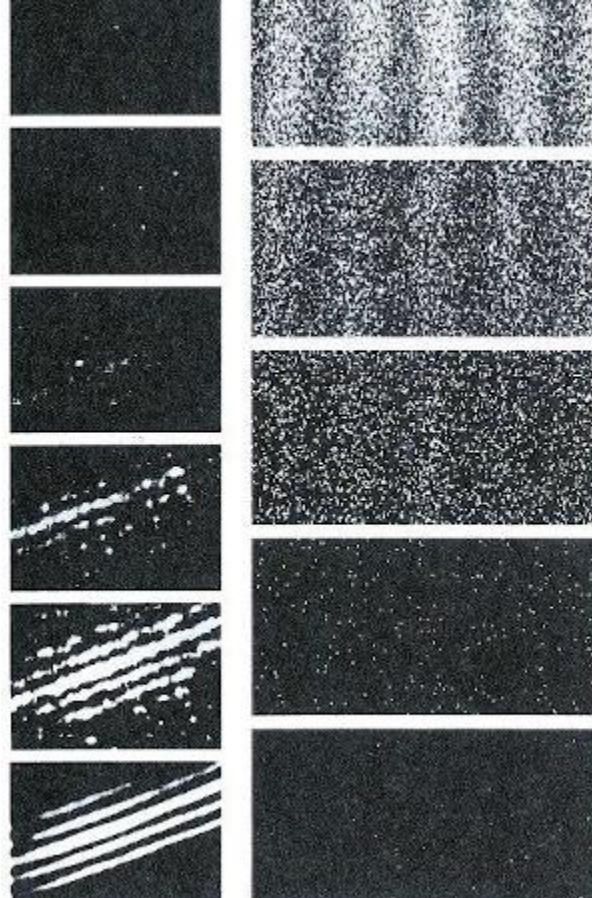
¹⁴⁶ Esta conversación está transcrita en Crease, *The Play of Nature*, pp. 117-118.

esta actitud la que los inspira a realizar un mayor esfuerzo en su arriesgado y exigente trabajo.

Capítulo 10

El único misterio

La interferencia cuántica de electrones individuales



Formación gradual de un patrón de interferencia con electrones individuales en el experimento de 1974 del grupo de Bolonia (izquierda) y en el experimento de 1989 del grupo de Hitachi (derecha). Las líneas, normalmente verticales, del grupo de Bolonia fueron rotadas mediante una lente magnética en el microscopio electrónico.

Decidimos examinar un fenómeno que es imposible, absolutamente imposible, de explicar por medios clásicos y que contiene en sí el alma de la mecánica cuántica. Contiene, en realidad, el único misterio.

RICHARD FEYNMAN

«Lo vi en un curso de óptica en la Universidad de Edimburgo», escribió una astrónoma en su contribución a mi encuesta de *Physics World*, refiriéndose al experimento de las dos rendijas con electrones. «El profesor no nos dijo qué iba a ocurrir», continuó, «y el impacto fue tremendo. Ya no recuerdo los detalles del experimento, pero sí la distribución de puntos que, de repente, vi que formaban un patrón de interferencia. Es fascinante del mismo modo que lo es una obra maestra de arte o una escultura. Ver el experimento de la doble rendija ejecutado ante tus ojos es como ver un eclipse de Sol total por primera vez: te recorre el cuerpo un escalofrío primitivo, sientes cómo se te eriza el vello en los brazos, piensas, ¡Dios mío! Esa historia de la onda-partícula es realmente cierta, y notas cómo las bases de tu conocimiento se tambalean».

En sus *Lectures on Physics (Conferencias sobre física)*, el físico estadounidense y premio Nobel Richard Feynman observaba que «a una escala muy pequeña, las cosas dejan de comportarse como cualquier cosa de la que tengamos experiencia directa». Aun así, como Feynman bien sabía, no es difícil que hasta el más versado de los físicos pase por alto las complicaciones de la mecánica cuántica y, pese a tener un conocimiento profundo del tema, imagine los electrones, los protones, los neutrones y otras de las partículas de

«ahí abajo» como los cuerpos de «aquí arriba», o sea, objetos sólidos e individuales que siguen trayectorias definidas cuando se desplazan del punto A al punto B, y que si por alguna razón los perdemos de vista, sabemos que todavía están «ahí» en un lugar y un tiempo concretos. Pero el caso es que podemos realizar experimentos que demuestran que no ocurre así en el dominio cuántico. Y esto choca de frente con la suposición, firmemente enraizada en la ciencia desde que el experimento de Eratóstenes nos ayudó a «ver» los cuerpos celestes, de que siempre podemos, de un modo u otro, concebir una imagen de las cosas fundamentales.

La demostración más vistosa y espectacular de que esto no es así, de que no es posible imaginar lo que ocurre en el mundo cuántico, es una versión del experimento de las dos rendijas de Thomas Young, pero no con luz, sino con haces de partículas subatómicas, con electrones. Debido a las dificultades técnicas que entraña la realización de este experimento y debido a que fue efectuado en etapas, éste es el único de esta selección de los diez experimentos más bellos que no está asociado a un único nombre. Se denomina simplemente experimento de la doble rendija, o experimento de la interferencia cuántica, con electrones individuales. En mi encuesta, éste fue el experimento más votado, y con diferencia. Es cierto que mi encuesta no era muy científica, pero no me cabe duda de que el carácter simple, innegable y sorprendente del experimento de las dos rendijas lo situarían muy arriba en cualquier lista de los más bellos experimentos científicos.

En sus conferencias de física y en otros libros, Feynman hace una elegante descripción de la naturaleza del comportamiento cuántico por medio de la comparación de un trío de experimentos de doble rendija: uno con balas (partículas), otro con agua (ondas) y un tercero con electrones (ambas y ninguna de ellas).

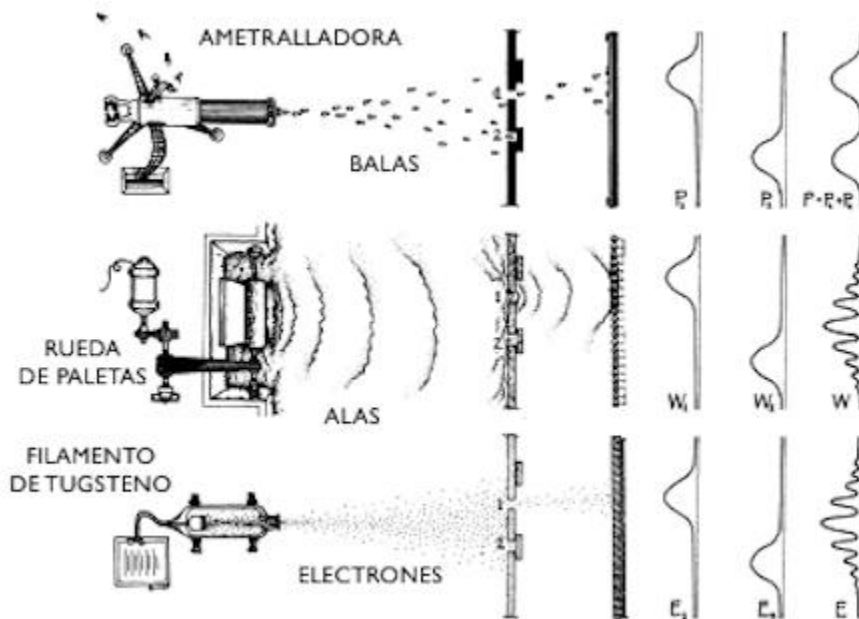


Figura 10.1. Tres experimentos de doble rendija que ilustran la falta de interferencia con objetos «granulares» (balas), la interferencia con objetos continuos (ondas en el agua) y la interferencia con objetos aparentemente «granulares» (electrones).

De manera progresiva va destilando «mediante una mezcla de analogía y contraste» las semejanzas y las diferencias en cada caso¹⁴⁷.

¹⁴⁷ R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 3, Addison-Wesley, Menlo Park, 1965, Capítulo 1; algunas de las citas que siguen están extraídas también de Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts,

En primer lugar, dice Feynman, imaginemos un experimento en el que una ametralladora dispara balas al azar contra una pared blindada en la que se hayan practicado dos pequeños agujeros. Cada agujero está provisto de un pequeño obturador que permite cerrarlo completamente. Además, los agujeros tienen el tamaño justo para dejar pasar una bala, que irá a impactar contra una pared al fondo. Casi todas las balas acaban impactando contra la pared del fondo en el mismo lugar, pero unas pocas rebotan en los bordes del agujero y se desvían, así que no podemos predecir adónde irá a parar una bala concreta. Como parte de este experimento, dice Feynman, imaginemos que en la pared del fondo podemos colocar un «detector de balas» que utilizamos para contar el número de balas que impactan en cada lugar. El objetivo perseguido por el experimentador es medir la probabilidad de que las balas impacten contra cada región de ese espacio. Cuando ponemos en marcha la ametralladora y comenzamos a contar los impactos, descubrimos primero que el detector, como es natural, siempre detecta balas completas: nunca encontramos en el detector media bala o una fracción cualquiera de una bala. El patrón de distribución de las balas es, por consiguiente, «granulado» o, como decía Feynman, cada bala llega en «un *bang*» y todas las medidas corresponden a un número concreto de balas completas. Pero lo más importante es que la probabilidad de encontrar una bala en un lugar determinado cuando los dos agujeros están abiertos es igual a la suma de las probabilidades de lo que ocurre cuando cada uno de

2001, capítulo 6. (Hay trad. cast.: *El carácter de la ley física*, Tusquets Editores, Barcelona, 2000).

los agujeros se abre por separado. Dicho de otro modo, la probabilidad de que una bala pase por el Agujero 1 no se ve afectada por el hecho de que el Agujero 2 esté abierto o cerrado¹⁴⁸. Por decirlo aún de otro modo algo distinto, si estamos en un campo de tiro y acertamos en la diana un cierto porcentaje de disparos, ese porcentaje no cambiará por el mero hecho de que otra persona dispare contra una diana cercana y comience a acertar o fallar tiros en la nuestra. Es lo que Feynman llama condición de «no interferencia».

Ahora, dice Feynman, imaginemos un segundo experimento, esta vez con un tanque de agua y una máquina para producir olas en lugar de una ametralladora. También en este experimento tenemos una pared con dos agujeros y, del otro lado, un fondo absorbente, una «playa» que no refleja las ondas que le llegan, además de un detector que podemos mover por donde queramos para medir la intensidad de las olas (que en realidad mediría la altura o amplitud de la onda, que, después de elevarla al cuadrado, nos daría la intensidad). Éste es, en esencia, el experimento de la doble rendija de Young aplicado a ondas de agua.

El objetivo del experimento es medir la intensidad del movimiento de las ondas cuando el Agujero 1 y el Agujero 2 se abren por

¹⁴⁸ Como todas las analogías, la de Feynman es sólo aproximada y, cuando se examina más de cerca, no es tan clara como parece. Las balas pueden colisionar entre sí antes de llegar al detector, lo que alteraría el patrón. Y unas balas del tamaño de electrones que rebotaran contra el margen de una diminuta pantalla, sufrirían e impartirían a la pantalla (a diferencia de las balas reales) un cambio de momento que podría afectar al patrón y a la siguiente interacción entre un electrón y la pantalla. Por último, la comparación que hace Feynman entre balas y ondas de agua es retórica. Cuando diluimos cualquier forma de la materia, acaba convirtiéndose en átomos o campos, que están cuantizados (son discretos), así que en realidad *nunca* obtenemos un patrón ondulatorio continuo.

separado y cuando se abren a la vez. Cuando ponemos en marcha la máquina de las ondas, afirma Feynman, podemos ver varias diferencias significativas con el experimento anterior. Para empezar, las ondas pueden ser de cualquier medida en lugar de ser «granuladas» o discontinuas como lo eran las balas; su altura puede variar de forma continua. Además, el patrón de variación de la intensidad cuando los dos agujeros están abiertos no es igual a la suma de los patrones observados cuando los agujeros se abren por separado. La razón de ello, como ya sabemos gracias al experimento de Young, es que las ondas de las dos fuentes están en fase en algunos lugares y fuera de fase en otros. Aquí tenemos, por tanto, una condición de «interferencia».

Por último, el tercer experimento imaginario de Feynman utiliza una fuente de electrones que dispara un haz de estas partículas contra una pared con dos agujeros. Una vez más, al otro lado de la pared tenemos una pantalla que recibe los impactos de los electrones y un detector. Pero ahora, prosigue Feynman, estamos tratando con el comportamiento cuántico y lo que ocurre es muy extraño. Como en el primer experimento, detectamos un patrón de distribución «granulado», puesto que los electrones al parecer llegan a la pantalla como individuos enteros: o bien el detector produce el clic que registra la llegada de un electrón, o no hace nada. Sin embargo, como en el segundo experimento, el patrón de distribución de los electrones cuando los dos agujeros están abiertos no es igual a la suma de los patrones que se producen cuando se abre cada uno de los agujeros por separado. El resultado es un patrón de

interferencia clásico. Para nuestro asombro, los electrones actúan como si fuesen ondas cuando pasan por las rendijas y como partículas cuando activan el detector.

Como son muchos los electrones que atraviesan las dos rendijas al mismo tiempo, podríamos pensar que el patrón de interferencia surge de algún modo del hecho de que muchos de los electrones colisionan entre sí por el camino. Pero una variante del experimento en el que los electrones se disparan de uno en uno prueba que no es eso lo que sucede. Bienvenidos al «único misterio».

Probemos, pues, a reducir la tasa de disparo de nuestra ametralladora de electrones hasta que los dispare de uno en uno, y ajustemos la frecuencia para que nunca haya más de un electrón atravesando la rendija. Ahora es imposible que se produzcan colisiones entre los electrones. Cuando ponemos en marcha la fuente de electrones, éstos se acumulan lentamente en el otro lado. Al principio, a medida que el detector va contando los electrones, da la impresión de que lleguen al azar. Pero al acumular más datos vemos con sorpresa que se forma un patrón, ¡un patrón de interferencia! Al parecer, cada electrón atraviesa las dos rendijas al mismo tiempo, como una onda, pero impacta contra el detector en un único punto, como una partícula. Cada electrón interfiere únicamente consigo mismo. ¿Cómo puede ser eso? Pero el caso es que es así. Es, como decía Feynman, el «único misterio». «No eludo nada; desnudo la naturaleza para mostrar su forma más elegante y difícil».

Como es difícil producir y observar electrones de uno en uno, los físicos creyeron durante mucho tiempo que era imposible realizar este experimento. No obstante, estaban convencidos de lo que pasaría si se hiciera porque disponían de muchas otras pruebas de la naturaleza ondulatoria de los electrones. Como Feynman decía a sus estudiantes:

Debemos decir de entrada que no se debe intentar realizar este experimento... Nunca se ha hecho del modo descrito. El problema es que habría que construir un aparato a una escala imposiblemente pequeña para poner de manifiesto los efectos que nos interesan. Aquí estamos haciendo un «experimento mental» que hemos elegido porque nos ayuda a reflexionar. Sabemos qué resultados se obtendrían porque hay muchos otros experimentos que se han realizado a una escala y proporciones apropiadas y que muestran los efectos que aquí describiremos.

Cuando Feynman dijo esto, a principios de la década de 1960, no era consciente de que la tecnología estaba avanzando hasta el punto de hacer posible en la práctica la versión cuántica del experimento de la doble rendija. De hecho, ya lo había realizado, en 1961, un estudiante de doctorado alemán llamado Claus Jönsson.

Nacido en Alemania en 1930, Jönsson era demasiado joven durante la segunda guerra mundial para ser reclutado por el ejército. Cuando los aliados forzaron la retirada de las fuerzas alemanas por Hamburgo, Jönsson y algunos compañeros de clase aficionados a la ciencia rebuscaron entre los equipos abandonados por las tropas. A

un jeep alemán le quitaron la batería y otros componentes eléctricos y con ellos realizaron experimentos de galvanización eléctrica. Su entretenimiento se terminó sólo cuando se les acabó la batería, pues no disponían de medios para recargarla.

Tras la guerra, Jönsson estudió en la Universidad de Tubinga con Gottfried Möllenstedt, un pionero de la microscopia electrónica que trabajaba en el Instituto de Física de esta universidad¹⁴⁹. Möllenstedt fue el coinventor (con Heinrich Düker) del biprisma para electrones, que es en esencia un biprisma de Fresnel pero para haces de electrones en lugar de luz (figura 10.2). Como se ha descrito en el capítulo seis, el dispositivo de las dos rendijas y el biprisma de Fresnel eran dos métodos conceptualmente distintos pero parecidos de dividir un haz de luz en dos conjuntos de ondas que interfieren entre sí. El método de Young dividía la luz de una única fuente en dos haces de luz que emanaban de dos rendijas separadas por una corta distancia; el biprisma de Fresnel dividía la luz de una sola fuente haciéndola pasar simultáneamente por dos caras de un prisma triangular. El biprisma de Möllenstedt divide un haz de electrones en dos componentes, lo cual se logra interponiendo de través un alambre extraordinariamente fino; tan fino, de hecho, que Möllenstedt al principio los fabricaba

¹⁴⁹ De 1888 a 1973, el Instituto de Física estuvo situado en el centro de la ciudad, y durante los últimos años los físicos que trabajaban sobre microscopia electrónica de alta resolución o sobre interferometría de electrones tuvieron que luchar contra las perturbaciones mecánicas y magnéticas causadas por la vida urbana. En 1973 el instituto se trasladó a un nuevo edificio situado en lo alto de una colina a las afueras de la ciudad. Igual que los astrónomos quieren tener sus telescopios lejos de las luces de la civilización, Möllenstedt quería que su instituto estuviera lejos de las perturbaciones electromagnéticas.

recubriendo de oro los hilos de seda de una telaraña (mantenía una colección de arañas en el laboratorio con este fin).

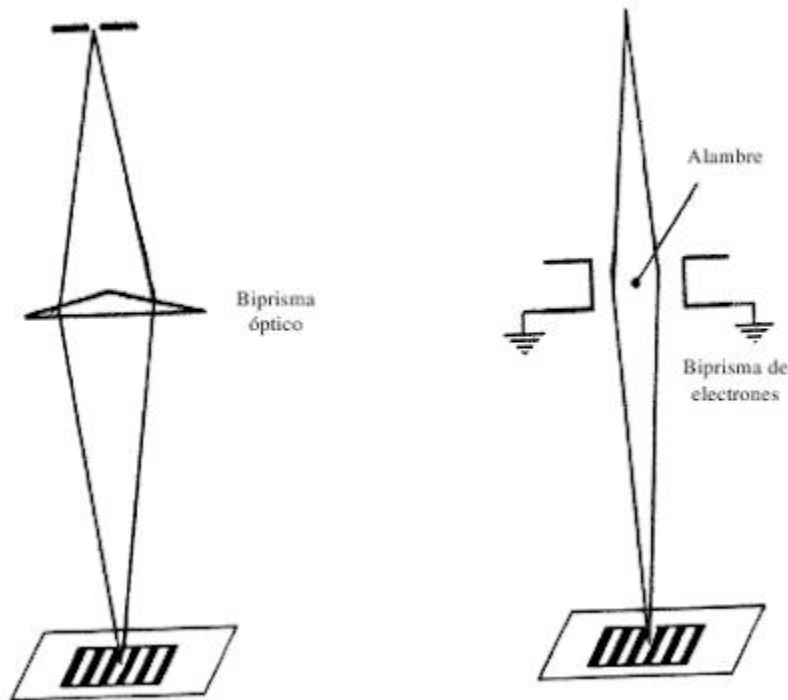


Figura 10.2. Ilustración de la diferencia entre una lente de Fresnel óptica (izquierda) y un biprisma de electrones de Möllenstedt-Düker (derecha).

Más tarde encontró una manera mejor y más barata de fabricar el hilo ultrafino usando fibras de cuarzo estiradas en una llama de gas y galvanizadas luego con oro. Cuando la fibra del biprisma estaba cargada positivamente, dividía el haz en dos componentes ligeramente desviados el uno hacia el otro de manera que podían interferir.

En el verano de 1955, Möllenstedt y Düker convocaron a sus colegas del instituto, Jönsson entre ellos, para enseñarles el primer

patrón de interferencia producido con un biprisma. Poco después, Jönsson concebía la idea de reemplazar el biprisma con una pequeña rendija doble, en un paralelismo expreso con el experimento de Young, con la intención de crear con él un patrón de interferencia entre electrones. Los obstáculos eran descomunales. Tenía que cortar unas rendijas extraordinariamente pequeñas en una lámina de metal especial. Mientras que las rendijas ópticas pueden montarse sobre algún material transparente, por ejemplo una lámina de vidrio, esto no sería posible en el caso del experimento con electrones porque ese material los dispersaría. Por consiguiente, la lámina de metal tenía que ser mecánicamente estable, o por lo menos lo bastante fuerte como para mantenerse sin deformaciones al recibir el impacto de los electrones. Jönsson topó aquí con el «compromiso del experimentador», puesto que cortar rendijas en un sustrato lo bastante grueso como para absorber los electrones tiende a dejar unos márgenes desiguales, mientras que con un sustrato más fino se consiguen unas rendijas más precisas pero a riesgo de que el propio sustrato pierda la capacidad de sustentarse sin tambalearse, lo que afectaría al comportamiento de los electrones al atravesar las rendijas. Por otro lado, las rendijas tenían que ser mucho más pequeñas que las de Young, puesto que los haces de electrones tienen sólo una amplitud de una diez millonésima de metro (diez micrómetros). Además, tenían que ser cortes absolutamente limpios, porque de lo contrario los electrones rebotarían en cualquier irregularidad y se dispersarían al azar, dando al traste con lo que se conoce como «coherencia» de los

electrones. Aquí, a Jönsson le vino de perilla su experiencia con la galvanización, ya que lo había llevado a desarrollar un gran respeto por la limpieza absoluta del sustrato. Sin embargo, varios profesores científicos manifestaron serias dudas de que Jönsson pudiera conseguir su objetivo e insistieron para que abandonara la idea. Pero Jönsson decidió seguir adelante gracias a la ayuda y aliento de Möllenstedt, quien le informó de que «*Es geht nicht*» *gibt es nicht für einen Experimentalphysiker* [«No funcionará» no está en el vocabulario de un físico experimental»].

Tras finalizar la primera parte de sus exámenes de doctorado en 1956, Jönsson comenzó a explorar métodos para cortar las rendijas en una lámina de metal del grosor suficiente, y al año siguiente ya había encontrado la manera de hacerlo¹⁵⁰. En la primavera de 1957, superó los exámenes finales de la parte teórica de su tesis y se dirigió a Möllenstedt para discutir un tema de disertación. Éste de

¹⁵⁰ Procedió de la siguiente manera: como sustrato temporal utilizó una lámina de vidrio de 4 × 4 cm recubierta con una capa de plata de 20 nanómetros depositada por evaporación. Ésta era lo bastante gruesa como para poder galvanizarla con cobre hasta obtener una lámina de 0,5 micrómetros de grosor. Pero ¿cómo se podrían practicar unas rendijas diminutas en esta lámina? Su primera idea era limarlas con una máquina como se solía hacer para producir rejillas de interferencia ópticas. Pero no tenía a mano ninguna máquina apropiada, aparte de que parecía muy difícil producir mecánicamente unas rendijas de tan sólo 0,5 micrómetros de longitud (se necesitaba una longitud tan corta para asegurarse de que la lámina metálica fuera mecánicamente estable). Aquí es donde resultaron útiles los antiguos experimentos de galvanización que había realizado Jönsson. Recordando que la más mínima suciedad sobre el sustrato impedía el crecimiento de una capa de galvanización, colocó sobre el sustrato de plata unas capas aislantes con la forma de las rendijas antes de galvanizar. En este punto cobró importancia otra de las máximas de Möllenstedt: si descubres en tu experimento un efecto producido por la suciedad, intenta utilizarlo en tu propio beneficio. Jönsson, en efecto, había observado un efecto producido por la suciedad: las llamadas capas de Steward, que surgen de moléculas de aceite condensadas a partir de vapor de aceite en el interior del microscopio electrónico. Estas moléculas de aceite se «resquebrajan» con el haz de electrones y se polimerizan formando la capa de Steward. Cuanto más tarde una persona en observar un objeto, más gruesa se hace la capa de Steward, reduciendo el contraste de la imagen. Jönsson experimentó con las capas de Steward y descubrió que podía ser un buen aislante para impedir la galvanización de cobre en los puntos del sustrato de plata donde se condensaban. Debo agradecer a Claus Jönsson su ayuda con estas explicaciones de sus experimentos.

entrada prefería que Jönsson trabajara sobre la interferencia producida por el biprisma, pero accedió a cambiar el tema. La primera parte del proyecto consistía en la construcción de una máquina que pudiera crear rendijas de menos de ochocientas milmillonésimas de metro (u ochocientos nanómetros) de tamaño, un aparato tan avanzado para su tiempo que Jönsson se convirtió en uno de los pioneros de lo que hoy se conoce como «nanotecnología¹⁵¹». Un problema constante era eliminar las perturbaciones mecánicas y magnéticas que pudieran distorsionar el patrón de interferencia. En 1959, Jönsson obtuvo su primer patrón de interferencia en bandas (figura 10.3) y recibió el doctorado por su trabajo en 1961.

Cualquier persona versada en mecánica cuántica sabía que el experimento de Jönsson no abría ningún nuevo camino teórico, así que a nadie le sorprendió el resultado. Aun así, le produjo una enorme satisfacción llevar a la práctica lo que más tarde llamó «un viejo experimento mental de la mecánica cuántica que antes hubiera parecido imposible, y un experimento de gran importancia

¹⁵¹ Construyó un dispositivo optoelectrónico para producir una sonda electrónica que imprimiera una capa de Steward en forma de rendija sobre el sustrato de plata. Para imprimir varias rendijas (hasta diez) una junto a otra, añadió a su aparato un condensador que desviara la sonda electrónica mediante voltajes eléctricos verticales a la dirección de la rendija. Una vez establecido el tiempo de exposición necesario para obtener una capa de Steward de 1050 nanómetros de grosor, Jönsson consiguió practicar las rendijas en la capa de cobre. Ahora se le planteaba el problema de cómo separar la capa de cobre del sustrato, y cómo eliminar la plata y el polímero de las rendijas. Aquí la naturaleza vino en ayuda de Jönsson. Descubrió que podía utilizar un par de pinzas para separar la lámina de cobre y plata del sustrato de la placa de vidrio en la dirección de las rendijas sin destruirlas. Cuando preparó las rendijas sobre un diafragma perforado y las observó al microscopio, pudo comprobar que no había quedado materia en las rendijas. Durante el proceso de impresión, el haz de electrones había unido las capas de Steward al sustrato de vidrio y plata, donde se quedaban cuando se retiraba la lámina de cobre. De este modo, dos de los mayores problemas de la preparación de las rendijas dejaron de ser un obstáculo.

pedagógica y filosófica». Cuando su artículo fue traducido al inglés y publicado en el *American Journal of Physics*, una revista dirigida a educadores de física, los editores se deshicieron en alabanzas hacia el experimento.

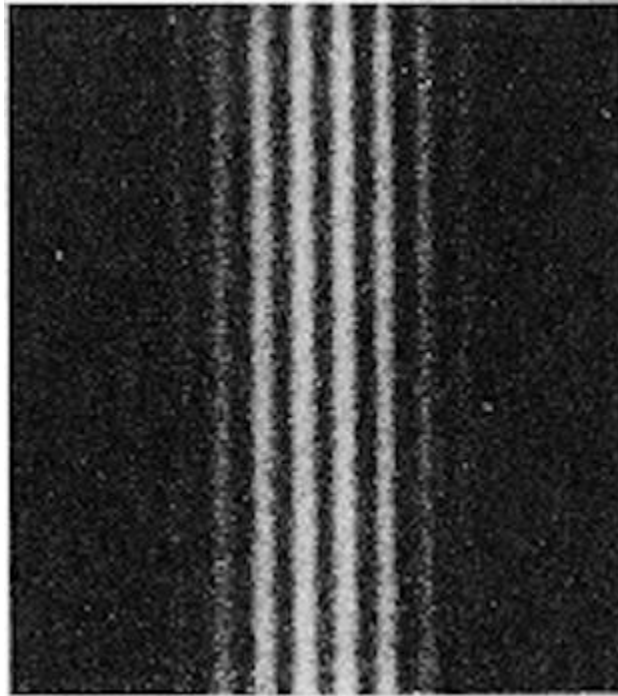


Figura 10.3. Patrón de interferencia de electrones del experimento de Jönsson.

Aunque no estuviera en la frontera de la física teórica, escribieron en su editorial, era un «gran experimento» y un «*tour de force* técnico» que ofrecía «la simplicidad conceptual de un experimento real, fundamental y pedagógicamente impecable cuya descripción y estudio puede enriquecer y simplificar el aprendizaje de la física cuántica» que, de este modo, ayudaba a abastecer «los

jugos de la realidad experimental que... transforman una disciplina formal en una profesión viva».

Por aquel entonces, todavía era imposible realizar el experimento con electrones individuales, pero también eso cambió durante la siguiente década. Esta versión final del experimento de la doble rendija con electrones individuales también tuvo su origen en circunstancias curiosas. En 1970, Pier Giorgio Merli y Giulio Pozzi, dos jóvenes investigadores del Laboratorio de Microscopia Electrónica de la Universidad de Bolonia, en Italia, asistieron a un taller internacional sobre microscopia electrónica en Erice (Sicilia). Allí les impresionó en especial una charla sobre unos nuevos intensificadores de imagen (en esencia, amplificadores de luz) lo bastante sensibles como para detectar electrones individuales, y regresaron ansiosos por comenzar proyectos de investigación sobre su uso. Su laboratorio había recibido la promesa de unos fondos del principal organismo nacional de investigación en Italia, el Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), pero por alguna razón el dinero se había quedado atascado en la lenta burocracia del gobierno. Al año siguiente, 1971, la administración del laboratorio envió a Pozzi y a un profesor de investigación, Gian Franco Missiroli, a las oficinas centrales del CNR en Roma para que intentasen descubrir qué retenía a los fondos.

Durante el viaje en tren a Roma, los dos investigadores se pusieron a hablar de física para sacarse de la cabeza la tensión de la inminente visita, el tipo de confrontación burocrática que todo científico detesta y se siente mal preparado para afrontar. Pozzi le

comentó a Missiroli su interés por trabajar con un biprisma para electrones, y ambos comenzaron a pensar en posibles proyectos en los que pudieran colaborar. Fue el inicio de una fructífera colaboración de treinta años. Missiroli no sólo era un científico lleno de inventiva, sino que además sentía un gran interés por convertir sus descubrimientos en lecciones sencillas y fáciles de enseñar para sus estudiantes, que luego ponía por escrito y publicaba. Los dos comenzaron a colaborar en experimentos a finales de 1971¹⁵².

Para entonces, Merli había dejado el laboratorio tras obtener una plaza en el recién fundado Laboratorio de Química y Tecnología para Materiales y Dispositivos Electrónicos (LAMEL), pero todavía podía colaborar con Pozzi, Missiroli y otros investigadores del Laboratorio de Microscopia Electrónica. Entre los tres construyeron un biprisma y lo montaron en un microscopio electrónico Siemens. Cuando Merli descubrió que en Milán se había instalado un intensificador de imagen capaz de detectar electrones individuales, los tres comenzaron a planear un experimento de interferencia de electrones en el que enviarían los electrones de uno en uno a través de un biprisma. Los tres investigadores se desplazaron hasta Milán para obtener las imágenes y allí, tras instalar el intensificador de imágenes en su microscopio electrónico, enseguida consiguieron detectar un patrón de interferencia.

Escribieron un artículo sobre el experimento y lo publicaron, igual que Jönsson había hecho, en el *American Journal of Physics*, con la

¹⁵² En 1972 obtuvieron los primeros patrones de franjas de interferencia con un biprisma insertado en el cartucho de especímenes de un microscopio electrónico Siemens Elmiskop 1A equipado con un filamento afilado de fabricación propia. Este trabajo mereció el premio al mejor experimento didáctico de la Sociedad Italiana de Física.

esperanza de que, según escribieron, «los experimentos de interferencia de electrones resulten más familiares para los estudiantes¹⁵³». Pero fueron más ambiciosos y, con el estímulo y la ayuda de otros dos científicos del LAMEL, decidieron realizar una pequeña película sobre su experimento para distribuirla por escuelas y bibliotecas locales. Esto resultó ser más difícil de lo que esperaban y mucho más caro, y los tres acabaron dedicando mucho tiempo a escribir la narración. Eran experimentadores, no teóricos, y tuvieron que poner mucha atención en expresar sus ideas con precisión y rigor.

El resultado fue ingenioso. Como Feynman y muchos otros, también ellos utilizaron una analogía en tres pasos para explicar el experimento, comenzando con la interferencia entre ondas (primero en la naturaleza y luego en un tanque de olas), para explicar después la interferencia de la luz usando un biprisma de Fresnel y, por fin, su propio experimento con el biprisma para electrones. Los tres actuaron en la película, que editó Merli seleccionando con cuidado la música de fondo para cada sección: música de flauta de Vivaldi para acompañar las partes clásicas (la interferencia del agua y de la luz) y música contemporánea atonal para las secciones cuánticas. La película acababa enseñando cómo se formaba lentamente un patrón de interferencia por acumulación de electrones individuales. El efecto era magnífico y la película (que puede verse en la web) ganó un premio en el Festival Internacional

¹⁵³ P. G. Merli, G. F. Missiroli y G. Pozzi, *American Journal of Physics* 44 (1976), pp. 306-307.

de Cine Científico celebrado en Bruselas en 1976¹⁵⁴. «Todavía hoy, cada vez que miro la película me impresiona», me dijo Pozzi. Es un sentimiento que muchos comparten.

En 1989, Akira Tonomura, científico jefe del Laboratorio de Investigación Avanzada de Hitachi Limited Japan, y un grupo de colaboradores realizaron un experimento con un microscopio electrónico utilizando un sistema de detección de electrones todavía más sofisticado y eficaz. También publicaron sus resultados en el *American Journal of Physics*¹⁵⁵. Y también realizaron una película que muestra en tiempo real cómo se forma un patrón de interferencia a partir de la acumulación gradual de electrones individuales. Tonomura presentó su película, también disponible en la web, en una charla pronunciada en la Real Institución¹⁵⁶. En un momento de su conferencia, aceleró el vídeo para mostrar cómo se materializaba, de forma misteriosa e inquietante, el patrón de interferencia a partir de unas manchas individuales y en apariencia dispuestas al azar, igual que una galaxia se forma ante nuestros ojos durante el crepúsculo a partir de estrellas diminutas, un patrón innegable que nos lleva a pensar en la existencia de estructuras universales más profundas. Mientras esto sucedía, el japonés decía:

¹⁵⁴ La dirección web es http://www.bo.imm.cnr.it/educational/main_educational.html.

¹⁵⁵ A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki y H. Ezawa, «Demonstration of Single-Electron Buildup of an Interference Pattern», *American Journal of Physics* 57 (1989), pp. 117-120.

¹⁵⁶ La conferencia pronunciada por Tonomura en la Real Institución está disponible en <http://www.vega.org.uk/video/programme/66>. Véase también Peter Rodgers, «Who Performed the Most Beautiful Experiment in Physics?», *Physics World*, septiembre de 2002.

Nos vemos obligados a aceptar una extraña conclusión: que los electrones son detectados uno a uno como partículas pero que en conjunto manifiestan propiedades ondulatorias, formando un patrón de interferencia. La mecánica cuántica nos dice que tenemos que abandonar la realidad [convencional] de nuestra concepción de los electrones como partículas salvo en el momento en que los detectamos.

En años más recientes, la interferencia cuántica se ha demostrado con otras partículas aparte de los electrones, e incluso con átomos y hasta con moléculas.

El experimento de la doble rendija aplicado a los electrones posee los tres aspectos esenciales de los experimentos bellos. Es fundamental en el sentido de que exhibe el comportamiento extraño y contrario a la intuición que presenta la materia a los niveles más bajos. Un electrón abandona una fuente para aparecer en un detector situado a poca distancia. Entre la producción y la observación, ¿dónde se encontraba? El experimento de interferencia cuántica, tanto si se usa una rendija doble o un biprisma, demuestra la imposibilidad de concebir un objeto cuántico como si tuviera el mismo tipo de presencia en el espacio y el tiempo que los objetos de nuestro mundo macroscópico. «¿Dónde se encontraba?» es una pregunta que no podemos hacer; estaba en todos los sitios y en ninguno. Si el experimento de las dos rendijas de Young ilustraba de manera dramática la necesidad de realizar un cambio de paradigma desde la luz como partículas a la luz como ondas, el experimento de las dos rendijas con electrones individuales es una

ilustración dramática de otro cambio de paradigma, de la física clásica a la cuántica.

Es también económico, porque a pesar de sus revolucionarias implicaciones, los equipos utilizados están en la actualidad al alcance de nuestra tecnología y los conceptos básicos son fácilmente comprensibles. Además, este experimento enseña de una forma concisa un aspecto misterioso de la mecánica cuántica. Los otros misterios de la mecánica cuántica, como los ilustrados por el célebre gato de Schrödinger, las desigualdades de Bell y los experimentos de no localidad, nacen del misterio de la interferencia cuántica.

Por último, es convincente y enormemente satisfactorio, capaz de persuadir de las verdades de la mecánica cuántica a los más recalcitrantes escépticos. Incluso para una persona versada en mecánica cuántica la teoría puede resultar abstracta y sus implicaciones, lejanas de nuestra percepción. Pero el experimento de la doble rendija convierte la teoría en una imagen sensible que se capta de manera inmediata. «Antes de verla [en la universidad], no me creía ni una sola palabra de la física “moderna” [del siglo XX]», escribió un científico en mi encuesta.

Este experimento tiene algo de la lúcida belleza del experimento de Young gracias a la inmediatez de la evidencia del patrón de interferencia. Tiene algo de la belleza de la sorpresa esperada del experimento de la torre inclinada de Pisa, que nos deleita al mostrarnos perceptualmente la violación de nuestro marco cotidiano; lo que este experimento muestra no es, desde luego,

misterioso si uno no está acostumbrado a la idea de que la materia viene en partículas discretas.

Finalmente, este experimento es bello (al menos para mí) por la forma en que sirve de eficaz colofón a la asombrosa hazaña de Eratóstenes. El experimento de Eratóstenes validó la intuición griega de que los cielos poseían, en último término, una arquitectura que podíamos imaginar, que a la escala más grande el universo consiste en cuerpos que se desplazan en un espacio de tres dimensiones. El experimento de la interferencia cuántica demuestra que, a la escala más pequeña, las cosas están entrelazadas de un modo que no puede concebirse o imaginarse de forma convencional. Con unos equipos contruidos con nuestras propias manos obtenemos pruebas convincentes de un mundo totalmente distinto. Por mucho que nos convenzamos de la teoría, el mundo de la mecánica cuántica probablemente siga siendo siempre contrario a la intuición de los seres humanos. El experimento de la doble rendija de la interferencia de electrones planta ante nuestros ojos su realidad de una forma dramática, económica y material. La experiencia de ver los clics de un detector que anuncian la llegada de electrones individuales a través de un biprisma o de un par de rendijas para formar un patrón de interferencia es una de las experiencias humanas más fascinantes e imponentes. Es por ello que el experimento de la interferencia cuántica con electrones individuales permanecerá en el panteón de los más bellos experimentos durante mucho tiempo.

Interludio

Los subcampeones

La lista de subcampeones de mi encuesta sobre los más bellos experimentos de la ciencia contiene docenas de experimentos de muchos campos. Algunos merecen ser citados aquí debido a sus circunstancias, a la insólita manera en que manifiestan su belleza o al simple hecho de que son mis preferidos.

El más antiguo es un experimento de hidrostática realizado, sin que lo buscara, por Arquímedes de Siracusa, el más conocido matemático e inventor de la Grecia clásica y, por cierto, coetáneo de Eratóstenes. Los historiadores consideran plausible que en el siglo III a. C. el rey Hierón de Siracusa le pidiera a Arquímedes que determinara la proporción de oro y plata de un presente que le habían hecho. De acuerdo con la fuente clásica sobre el episodio, Arquímedes meditaba sobre el problema sentado en una bañera cuando se dio cuenta de que «la cantidad de agua que rebosaba de la bañera era igual a la cantidad de su cuerpo que estaba sumergida [y que esto] le indicaba un método para resolver el problema¹⁵⁷». Como medir con precisión el volumen de un cuerpo por el agua que desplaza hubiera sido muy difícil, lo más probable es que Arquímedes se percatara de que el agua lo empujaba hacia arriba y que lo mismo haría con el regalo del rey, de manera que si pudiera medir el peso de la corona en el aire y en el agua y compararlos, podría hallar su densidad específica con la suficiente precisión como

¹⁵⁷ La fuente antigua sobre esta historia es el arquitecto e ingeniero romano Vitruvius Pollio; aquí la historia citada se basa en la entrada «Arquímedes» del *Dictionary of Scientific Biography*, Charles C. Gillispie (ed.) jefe, Scribner, Nueva York, 1970-1980.

para compararla con la del oro. ¿Corrió entonces Arquímedes desnudo por la ciudad gritando de alegría? Quizá no, pero la historia capta bien el espíritu de celebración que acompaña a los descubrimientos. Además, la leyenda ilustra de manera exacta de qué manera un descubrimiento no buscado puede transformar un evento rutinario en un bello experimento.

Entre los más fuertes aspirantes procedentes de las ciencias de la vida se encuentra el llamado experimento de Meselson-Stahl, que es el objeto de un libro del historiador Frederic Holmes titulado *Meselson, Stahl, and the Replication of DNA: A History of «The Most Beautiful Experiment in Biology»* (*Meselson, Stahl y la replicación del ADN: Historia del «más bello experimento de la biología»*)¹⁵⁸. Este experimento, realizado en 1957, confirmó que el ADN se replica del modo que predecía la entonces recién descubierta estructura de la doble hélice. Holmes tomó su subtítulo de la descripción hecha por uno de los investigadores, pero señala que la mayoría de los biólogos familiarizados con el experimento sentían lo mismo hacia él. Cuando preguntó a los científicos el porqué, sus respuestas hablaron de sencillez, precisión, claridad e importancia estratégica.

Los aspirantes de la psicología incluían dos que de manera simple pero convincente echaron por la borda dogmas bien establecidos sobre la conducta animal. Uno de los experimentos, realizado por el psicólogo estadounidense Harry Harlow, cuestionaba la idea de que el factor más fuerte en el vínculo entre una cría de primate y su

¹⁵⁸ Frederic Lawrence Holmes, *Meselson, Stahl, and the Replication of DNA: A History of «The Most Beautiful Experiment in Biology»*, Yale University Press, New Haven, 2001.

madre era la necesidad de comida. Harlow creó una serie de «monas madre» sustitutas, de las que unas estaban hechas de alambre y desprovistas de superficies suaves y las otras, de una tela blanda. En una batería de experimentos, el psicólogo encontró que las crías de mono mostraban fuerte preferencia por las madres sustitutas hechas con tela aunque sólo las de alambre contaban con pezones que les proporcionaban leche¹⁵⁹. Resultaba claramente evidente que la necesidad de vínculos personales (de amor y afecto, representados por la suavidad de la tela) era más fuerte que la necesidad de comida.

Otro bello experimento de psicología animal, éste realizado por John Garcia y Robert Koelling en 1966, puso en tela de juicio las llamadas leyes de la equipotencialidad de la conducta de aprendizaje debidas a B. F. Skinner, de acuerdo con las cuales un animal aprende por estímulo y respuesta y el condicionamiento puede enlazar igualmente bien cualquier estímulo con cualquier respuesta. Las ratas, por ejemplo, pueden ser enseñadas a evitar cierto tipo de agua aromatizada propinándoles una descarga eléctrica cada vez que la beben. Garcia y Koelling repitieron esta lección con un grupo de ratas pero con otro grupo cambiaron el estímulo: hicieron que el agua les provocara repugnancia. Este estímulo resultó ser mucho más eficaz que la descarga eléctrica. El experimento demostró de forma convincente que sentirse físicamente mal y sentir miedo tienen efectos muy distintos sobre el aprendizaje y sobre la manera en que los animales interpretan su

¹⁵⁹ Véase Deborah Blum, *Love at Goon Park: Harry Harlow and the Science of Affection*, Perseus, Cambridge, Massachusetts, 2002.

entorno. Sin embargo, sus conclusiones iban tan a contracorriente de la doctrina conductista de la equipotencialidad, entonces firmemente establecida, que los artículos de Garcia fueron rechazados por las revistas de la Asociación Americana de Psicología durante más de una docena de años¹⁶⁰.

Una demostración de ingeniería bella por su importancia, economía y contundencia es el famoso acto de Richard Feynman de sumergir una junta de sellado en un vaso de agua con hielo durante la investigación del desastre de la lanzadera espacial *Challenger*. Demostraba así de forma llamativa que la pérdida de elasticidad de unas juntas había sido la causa de la tragedia¹⁶¹.

Otro subcampeón de inquietante belleza son las expediciones británicas de 1919 para demostrar la curvatura de la luz de las estrellas por la gravedad, un experimento que inauguró una época al confirmar la predicción realizada por Einstein en 1915 en su Teoría General de la Relatividad y que dio enorme popularidad a este físico. Sin embargo, ni el eclipse que lo hizo posible (un fenómeno natural familiar) ni la determinación de las posiciones de las estrellas (una técnica astronómica familiar) eran nada fuera de lo normal. ¿Puede la belleza residir únicamente en las consecuencias dramáticas de un experimento?

Algunos argumentos teóricos son tan sucintos que no falta quien los califica de «bellos» en mi encuesta. Un ejemplo es la prueba de Stephen Hawking, que puede parafrasearse en once palabras, de

¹⁶⁰ J. Garcia y R. Koelling, «Relation of cue to consequence in avoidance learning», *Psychonomic Science* 4 (1966), pp. 123-124.

¹⁶¹ Disponible en la web en <http://www.aps.org/apsnews/0101/010106.html>.

que el universo no ha existido siempre («Es cierto porque si no todo estaría a la misma temperatura»), y la paradoja de Olbers («Mira al cielo. No tiene un brillo uniforme. Por tanto, el universo visible no es infinito»). Algunos de los que respondieron a la encuesta citaron ciertos experimentos que utilizando poco más que el ingenio lograron abrir vastos dominios para la exploración. Entre éstos se incluye la cámara de niebla de Wilson (mencionada en el capítulo nueve), que hace visible la traza de partículas cargadas y que Ernest Rutherford describió como «el experimento más maravilloso del mundo». También se citaron otros instrumentos, como el interferómetro de rayos X, el microscopio de efecto túnel y el cosmotrón, un acelerador de partículas del Laboratorio Nacional Brookhaven.

Un experimento cuya belleza se deriva de la dedicación de sus creadores es el realizado por los científicos italianos Marcello Conversi y Oreste Piccioni durante el bombardeo alemán de Roma de la segunda guerra mundial. Muchos científicos italianos se habían dispersado o ido del país, pero Conversi había logrado evitar ser reclutado a causa de su mala visión en el ojo izquierdo, mientras que Piccioni había sido reclutado pero destinado a Roma. Antes de la invasión aliada de Sicilia en julio de 1943, ambos pasaban las noches en la universidad ensamblando cables robados y equipos de radio trocados en el mercado negro para crear circuitos electrónicos de última generación con los que confiaban en medir la vida media de una enigmática partícula, el mesotrón, que se encontraba en los rayos cósmicos, las partículas procedentes del espacio que

bombardean de manera constante la superficie de la Tierra. Tras la invasión, los aviones estadounidenses comenzaron a bombardear la estación de trenes de mercancías de San Lorenzo, situada al lado de la universidad, y de vez en cuando caía alguna bomba en el campus. Aterrorizados, Conversi y Piccioni trasladaron todo su equipo a un colegio abandonado cercano al Vaticano que se había librado de los bombardeos, aunque tuvieron que compartir el sótano con unos miembros de la resistencia antifascista que lo utilizaban para almacenar armas. La situación empeoró todavía más después de que el gobierno italiano firmara un armisticio con los aliados y los nazis ocuparan Roma. Piccioni fue capturado en una ocasión pero pagó su rescate con una caja de medias de seda. Ambos continuaron trabajando fervientemente. «Nuestro trabajo era el único placer que nos quedaba», explicó en una ocasión Piccioni. Justo antes de que los aliados liberaran Roma en junio de 1944, Conversi y Piccioni lograron con un experimento ingenioso, elegante y absolutamente convincente mostrar que los mesotrones vivían algo más de 2,2 microsegundos, una vida media corta pero mucho mayor de lo que entonces se predecía. En su sótano de una ciudad en ruinas, Conversi y Piccioni fueron los primeros en darse cuenta de que los mesotrones (hoy conocidos como «muones») poseían propiedades bastante distintas de las que les atribuía la teoría al uso. Su descubrimiento fue un paso clave en el desarrollo del entonces joven campo de la física de las partículas elementales¹⁶².

¹⁶² Tomado de la descripción no técnica incluida en Robert P. Crease y Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*, Macmillan, Nueva York, 1986, pp. 164-165.

En cuanto a mis propios candidatos a los experimentos más bellos, quiero destacar el de la violación de la paridad de 1956-1957 dirigido, entre otros, por la científica Chien-Shiung Wu. Este experimento demostró que, en ciertas condiciones, las partículas y los núcleos se desintegran emitiendo electrones en ciertas direcciones preferentes con respecto a su eje de espín. De un solo y convincente golpe, quedó invalidada una de las suposiciones más fundamentales y firmemente establecidas de la física¹⁶³. También incluyo en mi lista el experimento de Maurice Goldhaber de 1957 que estableció la helicidad del neutrino, es decir, el modo en que los neutrinos giran con respecto a su dirección de desplazamiento. El experimento de Goldhaber era tan endemoniadamente ingenioso (se basaba en encontrar una compleja reacción nuclear en la que las propiedades de todas las partículas y los estados nucleares fuesen conocidos con la única excepción de la helicidad del neutrino, una condición que sólo se cumplía en una sola de las alrededor de tres mil reacciones conocidas) que la mayoría de los científicos de la época lo consideraban en principio imposible¹⁶⁴. Mientras que en la mayoría de los descubrimientos científicos uno tiene la impresión de que si los descubridores hubieran perdido el tren, otros hubieran acabado por realizar el descubrimiento, con este experimento no ocurre así. Un físico escribió más tarde que de no haber existido

¹⁶³ Para una descripción no técnica, véase *ibid.*, pp. 206-208.

¹⁶⁴ Para una descripción no técnica, véase Robert P. Crease, *Making Physics: A Biography of Brookhaven National Laboratory, 1946-1972*, University of Chicago Press, Chicago, 1999, pp. 248-250.

Maurice Goldhaber, «no estoy seguro de que la helicidad del neutrino se hubiera medido nunca¹⁶⁵».

Pero para conocer mi candidato número uno al experimento más bello de la ciencia, siga leyendo.

¹⁶⁵ Citado en *ibid.*, p. 400.

Conclusión

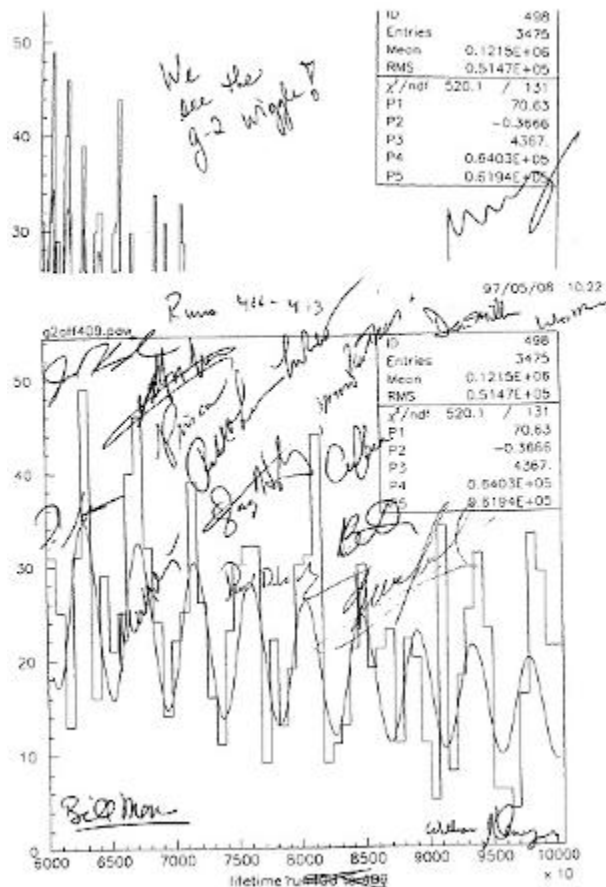
¿Todavía puede ser bella la ciencia?

Casi todos los experimentos de esta lista de los diez más bellos fueron realizados individualmente o, como mucho, con la ayuda de unos pocos colaboradores, y en un plazo de tiempo relativamente corto. Pero durante el último medio siglo se han producido cambios espectaculares en el tamaño y escala de los experimentos científicos. En la actualidad, los experimentos de física son a menudo interdisciplinarios y multinacionales, y no es raro que en ellos participen docenas de instituciones y cientos de colaboradores; además, pueden necesitar años e incluso décadas para completarse. ¿Puede un experimento en esta época de la Gran Ciencia ser todavía bello?

Sí.

Mi candidato personal al más bello experimento científico, el experimento del g-2 del muón, se ha realizado en cuatro ocasiones durante el último medio siglo mediante colaboraciones cada vez más amplias: las tres primeras veces en el Laboratorio Internacional CERN de Ginebra y más recientemente en el Laboratorio Nacional Brookhaven. En su última encarnación, la colaboración implicó a cientos de científicos de varios países que conjuntamente construyeron un aparato que contenía la mayor bobina superconductora del mundo y ocupaba una nave del tamaño de un hangar de avioneta. Debo confesar de entrada que parte del afecto que siento hacia este experimento es puramente personal, puesto que se está realizando en un edificio cercano a mí y llevo años

observando cómo se construye y pone en marcha. Sin embargo, mi familiaridad con el experimento (igual que ocurriría con una novela o pieza de música complejas) sólo hace más honda mi apreciación de su belleza.



Este gráfico de positrones de alta energía en función del tiempo fue la primera prueba de la precesión de los muones almacenados en el anillo del experimento g-2 de Brookhaven. Los presentes estaban tan entusiasmados que firmaron todos.

Este gráfico de positrones de alta energía en función del tiempo fue la primera prueba de la precesión de los muones almacenados en el

anillo del experimento g-2 de Brookhaven. Los presentes estaban tan entusiasmados que firmaron todos.

El experimento persigue medir lo que se conoce como el «momento magnético anómalo del muón». Mide el modo en que esta partícula, cuya vida media midieron por primera vez Conversi y Piccioni, se «bambolea» en un campo magnético¹⁶⁶. Para medir ese bamboleo se necesitaba una extraordinaria precisión, lo cual a su vez requiere un experimento ingenioso¹⁶⁷. Para medir cómo se bambolean los

¹⁶⁶ Como el lector ya habrá imaginado tras conocer el número de veces que se ha medido pese a la dificultad que entraña, el valor preciso del momento magnético anómalo del muón es uno de los números más buscados de la física. La razón es que cualquier discrepancia entre el número calculado por la teoría y el medido por los experimentadores revelaría información crucial sobre lo que podría esperarnos más allá del modelo estándar de la física de partículas elementales, el cuerpo teórico elaborado durante la segunda mitad del siglo XX que describe el comportamiento de los bloques básicos de la materia, es decir, de todas las partículas conocidas y de la mayoría de las fuerzas que las afectan. Véase William Morse *et al.*, «Precision Measurement of the Anomalous Magnetic Moment of the Muon», *Proc. of the XVIII Inter. Conf. on Atomic Physics*, H. Sadeghpour, E. Heller y D. Pritchard (eds.), World Scientific Publishing, 2002.

¹⁶⁷ Todos los muones giran continuamente alrededor de un eje y con la misma velocidad. Cuando se sigue una trayectoria circular en un campo magnético uniforme, este eje está sujeto a precesión, se «bambolea». La frecuencia de este bamboleo viene determinada por su cociente giromagnético o «factor g». En la física clásica, en la cual la masa de una partícula ocupa un lugar definido en el espacio y el tiempo, el factor g sería exactamente uno. Cuando P. A. M. Dirac combinó la relatividad y la mecánica cuántica, calculó para el factor g un valor de exactamente dos. Pero de acuerdo con el célebre principio de la indeterminación de Heisenberg de la mecánica cuántica, no puede determinarse toda la masa de un muón (o de cualquier otra partícula), que está envuelta en un halo de fantasmagóricas partículas virtuales de vida corta que el muón continuamente emite y absorbe. Esto hace que su factor g sea ligeramente distinto de dos. Los intentos por calcular una corrección de primer orden de este factor arrojaban un valor de infinito hasta que Feynman, Schwinger y Tomonaga lograron calcularlo en el marco de la electrodinámica cuántica, obteniendo un valor de 2,002. El experimento g-2 mide la diferencia entre el factor g y 2, o g-2, con una precisión superior a una millonésima. El valor de este número es de vital importancia para los físicos porque podría revelar la existencia de partículas todavía no conocidas. Esto, a su vez, podría revelarnos si el modelo estándar es completo. Si el valor medido experimentalmente se corresponde exactamente con el valor teórico, significaría que el modelo estándar es completo (al menos por lo que ahora podemos saber) y que cualquier otra gran teoría alternativa probablemente sea incorrecta. Una discrepancia, sin embargo, indicaría que el modelo estándar no es completo, que hay una nueva física por descubrir. La medición del bamboleo requería la planificación y ensamblaje de un ingenioso aparato. Su construcción llevó más de una década y precisó la supervisión de miles de delicadas partes del equipo que, naturalmente, tenían que trabajar conjuntamente. Hubo que buscar infinidad de compromisos, puesto que cada una de las partes podía potencialmente afectar a las otras. Los muones se crean con un acelerador de partículas de Brookhaven llamado AGS en el que los protones del acelerador se hacen colisionar contra una diana, creando toda una serie de partículas llamadas piones, que se desintegran en muones.

muones, los científicos estudian los electrones y los positrones que se producen durante su desintegración, aprovechando el fenómeno de la violación de la paridad descubierto por Wu y sus colegas, que reveló la dirección del espín del muón¹⁶⁸. Cuando se representan en un gráfico los datos de desintegración de miles de millones de muones, se observa claramente una pauta en zigzag, una serie de picos que de manera gradual reducen su altura y que reflejan la frecuencia con la que se bambolean los muones en el interior de la cámara.

Los primeros datos del más reciente experimento del Laboratorio Nacional de Brookhaven se obtuvieron en mayo de 1997. El primer científico que recopiló los datos de unos cuantos días y los representó en un gráfico, una física de la Universidad de Minnesota llamada Priscilla Cushman, notó enseguida el dibujo en zigzag que todos esperaban. Cuando Gerry Bunce, otro miembro del equipo del g-2, entró en la habitación, Cushman recuerda que,

Se lo puse ante los ojos y le dije, «¡Mira! ¡El g-2 se bambolea!». Me dijo, «¡Esta noche hacemos una fiesta!». Y yo le dije, «Pero ¡tenemos

Estos muones están polarizados, es decir, sus ejes de espín están alineados en la misma dirección. Una vez en el interior de un enorme imán superconductor, son «impulsados» para que orbiten en el centro de la cámara de vacío del interior del imán. El imán construido en Brookhaven para este propósito es el mayor del mundo, mayor que sus predecesores en tan gran medida que hubo quien creyó que el intento de construirlo estaba condenado al fracaso. El campo generado por este imán tiene que ser uniforme y constante, de modo que los físicos han de comprobar constantemente que no haya fluctuaciones. Uno de los métodos para hacerlo se basa en utilizar un sensor montado en un carrito, construido por los científicos, que periódicamente da una vuelta por toda la cámara de vacío. En una ocasión los científicos montaron una diminuta cámara en el carrito e hicieron una película del viaje de una hora, algo así como un largo y extraordinariamente monótono viaje por un túnel de metro.

¹⁶⁸ Un muón se desintegra en un electrón (y dos neutrinos), pero esta desintegración no se produce al azar; a causa de la violación de la paridad, los electrones de alta energía son emitidos en una dirección preferente con respecto al eje de espín del muón. Esos electrones son después captados por detectores situados en el interior del anillo.

tanto trabajo que hacer!». Pero Gerry tenía razón. Llevábamos tanto tiempo esperando, lo habíamos pasado tan mal con la financiación y con los críticos que decían que nunca lo lograríamos... y, encima, tras poner en marcha la máquina, pasaron dos semanas durante las cuales no vimos nada. Y entonces, de repente, esa cosa tan bella se nos apareció y ¡vimos que g-2 estaba allí!

Tras varios años recogiendo datos, los experimentadores habían logrado efectuar una de las medidas más precisas jamás realizadas de una propiedad de la física de partículas y habían podido compararla con el valor teórico, que es también uno de los números calculados (y medidos) con mayor precisión de la ciencia¹⁶⁹. Los resultados indicaban una discrepancia con el número predicho por la teoría. Esto sugería que una nueva física podía aparecer por el horizonte, lo que generó una gran excitación entre los físicos.

El experimento g-2 presenta los tres elementos de la belleza que hemos visto en los otros experimentos descritos en este libro: profundidad, o el carácter fundamental de su resultado; eficacia, o la economía de las partes; y carácter definitivo, la propiedad de que si se suscitan preguntas, éstas son sobre el mundo (o la teoría) y no sobre el experimento. Y pese a su escala, el experimento g-2 posee la amplitud del experimento de Eratóstenes, puesto que enlaza distintas escalas del universo (fenómenos con energías muy dispares) en una minúscula medición, la del bamboleo del muón.

¹⁶⁹ Un teórico de Cornell llamado Toichiro Kinoshita había pasado más de una década buscando una solución a las ecuaciones con las computadoras más potentes de que disponía para producir correcciones de alto nivel de este número.

Posee la belleza austera del experimento de Cavendish para pesar el mundo, en el que era necesario perseguir la precisión con fanatismo en el juego combinado de una miríada de piezas interconectadas. Tiene la cualidad sinóptica del experimento de Millikan, puesto que precisa de muchas de leyes universales distintas para conseguir su resultado, desde el electromagnetismo a la mecánica cuántica y de ésta a la relatividad¹⁷⁰. Y posee algo de la belleza sublime del péndulo de Foucault, porque apunta a dimensiones del universo todavía no concebidas.

En la introducción planteé dos preguntas sobre la idea de la belleza de los experimentos. Primero, ¿qué implica para los experimentos que puedan ser bellos? Y ¿qué implica para la belleza que los experimentos puedan poseerla?

En respuesta a la primera pregunta, entender de qué manera son bellos los experimentos nos ayuda a apreciar su poder afectivo. Muchas de las personas que respondieron a mi encuesta mencionaron experimentos y demostraciones que habían visto de niños; de hecho, a menudo era lo *único* que recordaban de los principios de su educación científica. Mirar la Luna por un telescopio por primera vez, observar a través de un microscopio las venas de las aletas de un pez hinchándose con cada latido, sostener una rueda de bicicleta por su eje mientras gira y sentir la resistencia que ofrece cuando se intenta voltearla, ver cómo una pelota de playa flota en una fuerte corriente de aire vertical, ver

¹⁷⁰ La relatividad está implicada, entre otras cosas, porque los muones viajan a una velocidad cercana a la de la luz y experimentan una dilatación del tiempo, de manera que en lugar de vivir 2,2 microsegundos, tienen una vida media relativamente longeva de 64 microsegundos; este fenómeno hace que el experimento sea posible.

cómo se aplasta una lata cuando se evacúa el aire de su interior, acontecimientos como éstos tienen una extraña habilidad para embargar nuestra imaginación.

Los experimentos no cautivan sólo a los estudiantes, sino también a los científicos más avezados. La emoción del descubrimiento no se parece a ninguna otra. Así lo entendió el ingeniero escocés John Scott Russell cuando, tras ver en el Union Canal de Edimburgo en 1834 una ola de onda única o solitón (una onda aislada que no se dispersa, como suelen hacer las ondas), lo llamó «el día más feliz de mi vida». Experiencias parecidas abundan en la historia de la ciencia.

Con demasiada frecuencia, los historiadores y los filósofos hacen caso omiso de las pasiones que tan claramente se manifiestan en estas historias. Algunos académicos lo hacen con la intención de resaltar la racionalidad de la ciencia, su lógica o justificación. Pero de ahí nace la imagen de la ciencia como un proceso robótico de formación, contrastación y reformulación de hipótesis; como un grandioso juego intelectual. En el frente opuesto, algunos historiadores y filósofos exploran las dimensiones sociales de la ciencia, su contexto social, revelado por su política, su financiación o sus beneficios¹⁷¹. Sin duda se trata de temas interesantes, pero tienden a presentarnos la ciencia tan sólo como una gigantesca lucha de poder protagonizada por un grupo de interés decidido a

¹⁷¹ Para una crítica del enfoque de la ciencia desde el constructivismo social y sobre el punto de vista según el cual la ciencia es en esencia una negociación política o legal en la que las partes implicadas intentan satisfacer sus intereses, véase Martin Eger, «Achievements of the Hermeneutic-Phenomenological Approach to Natural Science: A Comparison with Constructivist Sociology», en Robert P. Crease (ed.), *Hermeneutics and the Natural Sciences*, Kluwer, Dordrecht, 1997, pp. 85-109.

hacer avanzar su causa¹⁷². Si sólo conocemos la ciencia por su lógica y justificaciones, de un lado, o por sus logros materiales, del otro, no podremos comprenderla. Si tomamos el tiempo necesario para examinar la belleza de los experimentos científicos, podremos ver de forma más clara y definida su dimensión afectiva.

La respuesta a la segunda pregunta planteada anteriormente es que reconocer la belleza de los experimentos puede ayudar a revitalizar un sentido más tradicional de la belleza. En la actualidad, este término se aplica por lo general a obras de arte y a fenómenos naturales, pero no siempre ha sido así, y si sólo conocemos la belleza por los crepúsculos y los contenidos de los museos de arte,

¹⁷² Es tentador interpretar estos enfoques de «operativos», como la filósofa Maxine Sheets-Johnstone los apoda con sarcasmo, por su significado aparente. Pero son sólo formalizaciones y, como toda demostración de un proceso complejo, han sido elaboradas con una ideología y un propósito implícito: eliminar el cuerpo de la ciencia. No el cuerpo físico de carne y hueso, naturalmente, sino lo que los filósofos llaman «cuerpo vivido», la unidad primordial e insuperable productora de personas y mundos. Los académicos de orientación lógica quieren eliminar este cuerpo vivido y reconstruir la ciencia sin su dimensión afectiva porque ésta parece introducir un elemento de arbitrariedad e irracionalidad en lo que ven como un proceso impersonal y objetivo. Resultaría difícil —y seguramente artificial—, encontrar un lugar para la belleza en esta visión. Por otro lado, los académicos que se centran de manera exclusiva en las dimensiones sociales de la ciencia quieren eliminar el cuerpo vivido por la razón opuesta: porque admitir el papel fundacional del cuerpo humano animado en el conocimiento amenaza con la definición de estructuras generativas y originarias de la experiencia humana que no sólo resistirían el ser reducidas a factores sociales sino que, de hecho, en cierto modo los impulsan, y pueden barrerlos a un lado o incluso resistirlos. Es también poco el espacio que queda aquí para la belleza. Porque la belleza es un bien intrínseco, mientras que el lenguaje de la lucha de poder reduce todos los bienes a bienes instrumentales. Por lo tanto, este enfoque de la ciencia es tan deshumanizante como el enfoque de orientación lógica, que concibe la ciencia en términos excesivamente racionales. Para saber más sobre el papel del cuerpo en la indagación humana, véase Sheets-Johnstone, *The Primacy of Movement*, John Benjamins, Filadelfia, 1999. Al igual que los artistas, los científicos trabajan con todo su ser, lo que significa que su obra tiene una dimensión irreductiblemente afectiva. Despojando a la ciencia de sus elementos de afecto y belleza, la representamos de forma drásticamente errónea; el resultado es una imagen de la ciencia que no pasa de ser un producto de la imaginación académica, un artefacto. Una explicación más plena implicaría admitir un papel para algo como la belleza, la revelación definitiva de lo que es fundamental, que nos mantiene absortos por un momento en presencia de algo que pertenece al mismo tiempo al dominio de los sentidos y al dominio de las ideas. Una explicación cabal implicaría asimismo admitir un papel para el amor, la pasión que es el correlato del objeto bello: lo que una cosa bella inspira y lo que uno siente hacia las cosas bellas.

no podremos comprender cabalmente su papel en la vida y cultura humanas. Los antiguos griegos no veían una conexión especial entre lo bello, a lo que llamaban *kalon*, y las obras de arte, y encontraban la belleza en cualquier cosa que mereciera ser vista por su propio valor. No asociaban la belleza con las decoraciones o los ornamentos sino con las cosas ejemplares, incluso con leyes, instituciones, almas y acciones. En consecuencia, percibían una conexión íntima entre la verdad, la belleza y la bondad, a las que veían «enmarañadas» e inseparablemente unidas en un origen común y profundo.

Platón llamaba belleza al reflejo de lo ideal en el reino de lo visible. La belleza es el resplandor que emanan las cosas buenas y verdaderas (las que encontramos a un tiempo iluminadoras, irresistibles y gratificantes) cuando aparecen en el mundo habitado y percibido por los finitos humanos. Los órdenes superiores de la naturaleza se anuncian a sí mismos ante los amantes de la sabiduría con su belleza. Por esta razón, sostenía Platón, los amantes del conocimiento no desatienden, sino que cultivan el sentido de la belleza, pues con ello cultivan al mismo tiempo el sentido de la verdad. El mundo nunca es del todo transparente para nosotros y lo encaramos con unas suposiciones que nos transmite la historia y la cultura y que, sin bien nos revelan mucho, también es mucho lo que nos ocultan. Pero también encontramos cosas, esas que llamamos bellas, que nos sacan de nuestra confusión e ignorancia. Las cosas bellas, escribe Platón en *El banquete*, nos convocan a un contacto más profundo con el mundo; son como

escalas por las que podemos «ir ascendiendo constantemente¹⁷³». Las escalas y las transiciones siempre nos llevan de un lugar a otro; el lugar de los humanos en el mundo no es fijo sino móvil. Y cuando nos dejamos llevar hacia arriba, alcanzamos una conexión más íntima con nosotros mismos y con el mundo, y nos hacemos más humanos. Es así como la capacidad de reconocer la belleza de los experimentos nos puede ayudar a abrir los ojos ante un sentido de la belleza más fundamental.

Los científicos no estudian la naturaleza porque sea útil; la estudian porque les place, y les place porque es bella. Si la naturaleza no fuese bella, no valdría la pena conocerla, no valdría la pena vivir la vida.

HENRI POINCARÉ

¹⁷³ Platón, *El banquete*, 211C.

Agradecimientos

Este libro surgió de un artículo que escribí para *Physics World*, y estoy en deuda con sus editores, especialmente con Martin Durrani y Peter Rodgers, por darme la oportunidad de escribir una columna para esa revista, así como con los centenares de personas que respondieron a mi encuesta original. Escribí este libro (al tiempo que perseguía otros proyectos) durante un aparte de un período sabático fuera de la Universidad Stony Brook que realicé en el Instituto Dibner de Historia de la Ciencia y la Tecnología en el MIT; estoy en deuda con su director, George E. Smith, y con otros miembros del instituto —Carla Chrisfield, Rita Dempsey, Bonnie Edwards y Trudy Kontoff—, así como con el personal de la biblioteca Burndy: Anne Battis, Howard Kennet, David McGee, Judith Nelson y Ben Weiss. Estoy en deuda con mi agente literario, John Michel, que me guió con imaginación en la dirección correcta, así como con mi editor, William Murphy. Como todos los columnistas, busco en otros inspiración, ideas e información. Entre los que me proporcionaron sugerencias, comentarios e información útiles o que me ayudaron de algún otro modo se encuentran: Philip Bradfield, Edward Casey, Elizabeth Cavicchi, Stephanie Crease, Robert DiSalle, Patrick Heelan, Jeff Horn, Thomas Humphrey, Don Ihde, Claus Jönsson, Kate de South Country, Jean-Marc Lévy Leblond, Gerald Lucas, Peter Manchester, Alberto Martínez, Pier Giorgio Merli, Lee Miller, Arthur Molella, Giulio Pozzi, Patri Pugliese, Evan Selinger, Thomas Settle, Steve Snyder, Bob Street, Clifford Swartz,

Akira Tonomura, Jeb Weisman, Evan Welsh, Donn Welton y muchos otros. Como siempre, me han dado energía los sonidos de la sorpresa. Por último, quiero agradecer a Jack Train, Jr., su innovadora divulgación científica, sus brillantes dotes de corrector y su generosidad que han sido para mí fuente de inspiración durante décadas.

Índice de ilustraciones

El contador de horas más antiguo *Louvre* ©*Photo RMN*

Figura 1.1. Razonamiento de Eratóstenes

Figura 1.2. Medición de Eratóstenes

La torre inclinada de Pisa

Plano inclinado con campanas © *Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze*

Figura 3.1. Plano inclinado y caída libre

Figura 3.2. Reconstrucción de la demostración de Galileo *Reimpreso con permiso de Science 133 (1961) 20; © 1961, American Association for the Advancement of Science*

Experimentum crucis de Newton

Figura 4.1. La luz atravesando un prisma

Figura 4.2. *Experimentum crucis*

Equipo de Henry Cavendish para medir la densidad de la Tierra

Figura 5.1. Las bolas y la viga de Cavendish

Patrón de interferencia

Figura 6.1. Patrón de interferencia

El péndulo de Foucault en el Panteón

Figura 7.1. El péndulo de Foucault en el Panteón

El aparato de las gotas de aceite de Robert Millikan *Cortesía de los Archivos del Instituto de Tecnología de California*

Figura 8.1. Diagrama del aparato de las gotas de aceite

Primera anotación de Rutherford de la estructura del átomo

Figura 9.1. Detección de la dispersión de gran ángulo

Formación gradual de un patrón de interferencia con electrones individuales *Utilizado con permiso del grupo de Bolonia, del grupo de Hitachi y de la American Association of Physics Teachers, extraído de American Journal of Physics 44 (1976), 306; 57 (1989), 120*

Figura 10.1. Tres experimentos de doble rendija *Utilizado con permiso de los herederos de Heinz Pagels, © 1982, Heinz Pagels*

Figura 10.2. Biprismas óptico y de electrones

Figura 10.3. Patrón de interferencia de electrones *Usado con permiso de Claus Jönsson, extraído de American Journal of Physics 42 (1974), 9*

El primer garabato del g-2 de Brookhaven

El autor

ROBERT P. CREASE (Philadelphia, Pennsylvania, 22 de Octubre de 1953). Es un filósofo y el historiador de la ciencia. Es co-editor de la revista académica *Física en Perspectiva* y escribe una columna mensual, «Puntos Críticos», para la revista de física internacional *Physics World*.

Es Presidente del Departamento de Filosofía de la Universidad de Stony Brook, donde ha sido profesor desde 1987. En la filosofía de sus intereses se encuentran en la teoría desempeño, experiencia y confianza. En la historia de la ciencia su interés se centra en la historia del



Laboratorio Nacional de Brookhaven, uno de los tres primeros laboratorios nacionales de Estados Unidos; es co-fundador de las conferencias de historia laboratorio que se han celebrado cada dos años desde 1999. En 2007 fue elegido miembro de la Sociedad Física Americana (APS) en los Estados Unidos, y el Instituto de Física (IOP) en Londres.

Ha escrito, co-escrito, traducido o editado más de una docena de libros. Sus artículos han aparecido en el *Atlántico*, el *New York Times*, el *Wall Street Journal*, y otros lugares.