

# EL SUEÑO DE UNA TEORÍA FINAL

La búsqueda de las leyes  
fundamentales de la naturaleza

STEVEN  
WEINBERG



2018

DRAKONTOS  
BOLSILLO

## Reseña

El éxito alcanzado por la física en este siglo no sólo ha transformado nuestra concepción del espacio y del tiempo, sino nuestra percepción de la naturaleza: la vieja posición central que asignábamos a la materia ha cedido su lugar a los principios de simetría, algunos de ellos ocultos a la vista en el estado actual del universo.

Steven Weinberg, Premio Nobel de Física por su contribución a la unificación de dos de las fuerzas fundamentales de la naturaleza — la fuerza débil y el electromagnetismo—, aborda en este libro la gran aventura intelectual de nuestro tiempo: la búsqueda de una «teoría final»: aquélla en que todas las preguntas fundamentales hallarían respuesta, sin requerir una explicación en términos de otros principios más profundos; algo que, sin embargo, parece ser incompatible con la existencia de un Dios interesado.

Weinberg, que no sólo es un gran físico sino un excelente divulgador, nos explica de manera llana y comprensible la idea de esta «teoría final», nos hace seguir los pasos que han conducido hacia ella, los obstáculos que encuentra, y nos deja en la frontera de esta tierra prometida, no sabemos si cercana o distante, pero accesible a la mente humana, para explicarnos cómo será la teoría final: algo extremadamente sutil y bello «como una pieza de porcelana fina que no puede deformarse sin hacerse añicos».

## Índice

### [Prefacio](#)

### [Prólogo](#)

1. [Sobre un trozo de tiza](#)
2. [Dos hurras por el reduccionismo](#)
3. [La mecánica cuántica y sus descontentos](#)
4. [Historias de teoría y experimento](#)
5. [La belleza de las teorías](#)
6. [Contra la filosofía](#)
7. [Blues del siglo XX](#)
8. [La forma de una teoría final](#)
9. [Frente a la finalidad](#)
10. [¿Y qué pasa con Dios?](#)
11. [Ellis County, allá en el sur](#)

### [El fin del Supercolisionador](#)

*A Louise y Elizabeth*

## **Prefacio**

*Este libro trata acerca de una gran aventura intelectual, la búsqueda de las leyes finales de la naturaleza. El sueño de una teoría final inspira una gran parte del trabajo en curso en física de altas energías y, aunque no sabemos cuáles puedan ser las leyes finales o cuántos años pasarán antes de que sean descubiertas, pensamos que en las teorías actuales ya estamos empezando a vislumbrar las líneas generales de una teoría final.*

*La propia idea de una teoría final es controvertida y objeto de intenso debate en la actualidad. Esta controversia ha llegado incluso a las salas de comisiones del Congreso; la física de altas energías se ha hecho cada vez más costosa, y sus peticiones de apoyo público se basan en parte en su misión histórica de desvelar las leyes finales.*

*Mi intención, desde el primer momento, ha sido la de presentar a lectores sin conocimientos previos de física o de matemáticas superiores las cuestiones que plantea la idea de una teoría final como parte de la historia intelectual de nuestra época. Este libro trata sobre las ideas claves que subyacen en el trabajo actual en las fronteras de la física. Pero éste no es un libro de texto de física, y el lector no encontrará aquí capítulos claramente separados sobre partículas, fuerzas, simetrías y cuerdas. En lugar de ello, he entremezclado los conceptos de la física moderna en la discusión de lo que entendemos por una teoría final y lo que hacemos para descubrirla. En esto me he*

*guiado por mi propia experiencia como lector en campos, tales como la historia, que no son los míos. A menudo, los historiadores sucumben a la tentación de dar en primer lugar una historia narrativa, seguida de capítulos independientes sobre fundamentos de demografía, economía, tecnología y demás. Por el contrario, los historiadores que uno lee por placer, desde Tácito y Gibbon a J. H. Elliott y S. E. Morison, mezclan la narrativa y los fundamentos al mismo tiempo, construyendo un argumento para cualquier conclusión que desean establecer ante el lector. Al escribir este libro he tratado de seguir sus pasos y resistirme a la tentación del orden. Tampoco he dudado en recurrir a materiales históricos o científicos que quizá sean ya familiares a los lectores que son historiadores o científicos, o incluso repetir este material donde pienso que puede ser útil. Como dijo Enrico Fermi, nunca debemos subestimar el placer que sentimos al oír algo que ya sabemos.*

*Esta obra está dividida, más o menos, en tres partes y una coda. La primera parte, capítulos 1 a 3, presenta la idea de una teoría final; los capítulos 4 a 8 explican cómo hemos sido capaces de progresar hacia una teoría final; y los capítulos 9 a 11 pretenden especular sobre la forma de una teoría final y en qué medida su descubrimiento afectará a la humanidad. Finalmente, en el capítulo 12 vuelvo a los argumentos a favor y en contra del Supercolisionador Superconductor, un instrumento nuevo y costoso que los físicos de altas energías necesitan desesperadamente, pero cuya financiación futura sigue siendo dudosa.*

*Los lectores encontrarán una discusión más completa de algunas de*

*las ideas que aparecen en el texto central en una serie de notas al final del libro. Cuando en algún lugar del texto he tenido que simplificar demasiado algún concepto científico, he incluido un comentario más preciso en una nota final. Estas notas incluyen también referencias bibliográficas sobre el material citado en el texto. Estoy profundamente agradecido a Louise Weinberg por haberme empujado a reescribir una primera versión de este libro, y por ver cómo debería hacerse.*

*Expreso mi sincero agradecimiento a Dan Frank de Pantheon Books por su aliento y su guía y edición perspicaces, y a Neil Belton de Hutchinson Radius y a mi agente, Morton Janklow, por sus importantes sugerencias.*

*También estoy en deuda por sus consejos y comentarios sobre varios temas con los filósofos Paul Feyerabend, George Gale, Sandra Harding, Myles Jackson, Robert Nozick, Hilary Putnam y Michael Redhead; los historiadores Stephen Brush, Peter Green y Robert Hankinson; los juristas Philip Bobbitt, Louise Weinberg y Mark Yudof; los físicos-historiadores Gerald Holton, Abraham Pais y S. Samuel Schweber; el físico-teólogo John Polkinghorne; los psiquiatras Leon Eisenberg y Elizabeth Weinberg; los biólogos Sydney Brenner, Francis Crick, Lawrence Gilbert, Stephen J. Gould y Ernst Mayr; los físicos Yakir Aharonov, Sidney Coleman, Bryce De Witt, Manfred Fink, Michael Fisher, David Gross, Bengt Nagel, Stephen Orzsag, Brian Pippard, Joseph Polchinski, Roy Schwitters y Leonard Susskind; el químico Roald Hoffmann; los astrofísicos William Press, Paul Shapiro y Ethan Vishniac; y los escritores James Gleick y Lars*

*Gustafsson. Gracias a su ayuda se han evitado muchos errores graves.*

STEVEN WEINBERG

Austin, Texas, agosto de 1992

## Prólogo

*Si alguna vez alcancé una belleza  
que hubiera visto y deseado,  
tan sólo fue un sueño de ella<sup>1</sup>.*

*JOHN DONNE, The Good-Morrow*

El siglo que está a punto de finalizar ha visto una deslumbrante expansión de las fronteras del conocimiento científico en el campo de la física. Las teorías de la relatividad especial y general de Einstein han cambiado para siempre nuestra idea del espacio y el tiempo, y de la gravitación. En una ruptura aún más radical con el pasado, la mecánica cuántica ha transformado el propio lenguaje que utilizamos para describir la naturaleza: en lugar de partículas con posiciones y velocidades definidas, hemos aprendido a hablar de funciones de onda y probabilidades. De la fusión de la relatividad con la mecánica cuántica ha surgido una nueva idea del mundo en la que la materia ha perdido su papel central. Este papel ha sido usurpado por los principios de simetría, algunos de ellos ocultos a la vista en el estado actual del universo. Sobre esta base hemos construido una teoría satisfactoria del electromagnetismo y de las interacciones nucleares débil y fuerte entre las partículas elementales. A veces nos hemos sentido como Sigfrido después de probar la sangre del dragón, cuando descubrió, para su sorpresa, que podía entender el lenguaje de los pájaros.

---

<sup>1</sup> [If ever any beauty I did see, / Which I desir'd, and got, 'twas but a dream of thee].



Pero ahora estamos bloqueados. Los años transcurridos desde mediados de los setenta han sido los más frustrantes en la historia de la física de partículas elementales. Estamos pagando el precio de nuestro propio éxito: la teoría ha avanzado tanto que futuros progresos requerirán el estudio de procesos a energías mucho más allá del alcance de las instalaciones experimentales existentes. Para salir de este punto muerto, los físicos comenzaron en 1982 a desarrollar planes para un proyecto científico de una envergadura y coste sin precedentes, conocido como el Supercolisionador Superconductor. En su forma final el plan exigía un túnel oval de 85 kilómetros de longitud que debería ser excavado en un lugar al sur de Dallas. En el interior de este túnel subterráneo, miles de bobinas magnéticas superconductoras guiarían dos haces de partículas cargadas eléctricamente, conocidas como protones, para que dieran millones de vueltas en direcciones opuestas en torno al anillo, al tiempo que dichos protones se acelerarían hasta alcanzar una energía veinte veces mayor que la energía más alta conseguida en los aceleradores de partículas ya existentes. En varios puntos a lo largo del anillo, los protones de los dos haces se harían colisionar cientos de millones de veces por segundo, y enormes detectores, algunos con un peso de decenas de miles de toneladas, registrarían lo que sucede en estas colisiones. El coste del proyecto se estima en unos 8000 millones de dólares.

El Supercolisionador se ha atraído una intensa oposición, no sólo por parte de los austeros congresistas sino también por parte de algunos científicos que preferirían ver este dinero invertido en sus

propios campos. Hay muchas críticas soterradas sobre la llamada Gran Ciencia, y algunas de ellas han encontrado un blanco en el Supercolisionador. Mientras tanto, el consorcio europeo conocido como CERN está considerando la construcción de una instalación en cierto modo similar, el Gran Colisionador de Hadrones, o LHC. El LHC costará menos que el Supercolisionador ya que aprovechará un túnel ya existente bajo las montañas del Jura, cerca de Ginebra, pero, por esta misma razón, su energía estará limitada a menos de la mitad de la del Supercolisionador. En muchos aspectos, el debate norteamericano sobre el Supercolisionador tiene un paralelo en un debate europeo sobre si construir o no el LHC.

Cuando este libro va a las prensas en 1992, la financiación para el Supercolisionador, que fue cortada en junio por un voto en la Cámara de Representantes, ha sido reanudada en agosto por el voto del Senado<sup>2</sup>. El futuro del Supercolisionador estaría asegurado si hubiera un importante apoyo externo, pero hasta ahora esto no se ha producido. Tal como están las cosas, incluso si la financiación para el Supercolisionador ha sobrevivido este año en el Congreso, se enfrenta a la posibilidad de cancelación por el Congreso el próximo año y en cada año venidero hasta que el proyecto esté completo. Pudiera ser que los años finales del siglo xx vieran cómo la investigación sobre las bases de la ciencia física llegaba a detenerse, quizá para ser reanudada muchos años más tarde.

Éste no es un libro acerca del Supercolisionador, pero el debate sobre el proyecto me ha involucrado en conferencias públicas y en

---

<sup>2</sup> Para más información respecto al estado actual del debate sobre el Supercolisionador, véase el *Post scriptum* del autor incluido en esta edición (pp. 219-223). (*N. del e.*)

comparecencias ante el Congreso para tratar de explicar lo que intentamos conseguir en nuestros estudios sobre las partículas elementales. Podría pensarse que después de treinta años de trabajo como físico yo no tendría problemas con esto, pero la cosa no es tan fácil.

Por lo que a mí respecta, el placer del trabajo siempre me ha proporcionado justificación suficiente para hacerlo. Sentado a mi mesa de despacho o a alguna mesa de café, yo manipulo las expresiones matemáticas y me siento como Fausto jugando con sus pentagramas antes de la llegada de Mefistófeles. De vez en cuando, las abstracciones matemáticas, los datos experimentales y la intuición física convergen en una teoría precisa sobre las partículas, los campos y las simetrías. Y aún más de tarde en tarde, la teoría resulta ser correcta; a veces los experimentos muestran que la naturaleza realmente se comporta como la teoría dice que debe hacerlo.

Pero esto no es todo. Para los físicos que trabajan sobre partículas elementales existe otra motivación que es muy difícil de explicar incluso para nosotros mismos.

Nuestras teorías actuales son de validez limitada, provisionales e incompletas, pero tras ellas observamos, aquí y allá, retazos de una teoría final que sería de validez ilimitada y enteramente satisfactoria en su perfección y consistencia. Buscamos verdades universales acerca de la naturaleza y, cuando las encontramos, intentamos explicarlas demostrando cómo pueden ser deducidas a partir de verdades más profundas. Consideremos el espacio de los principios

científicos como si estuviera lleno de flechas que apuntan hacia cada principio desde otros principios por los que los primeros son explicados. Estas flechas explicativas han revelado ya una notable estructura: las flechas no forman grupos separados e inconexos que representan ciencias independientes, ni tampoco corren sin rumbo. Por el contrario, todas ellas están conectadas y, si las seguimos hacia atrás, todas ellas parecen surgir de un punto de partida común. Este punto de partida, hasta el que todas las explicaciones pueden ser rastreadas, es lo que yo entiendo por una teoría final.

Ciertamente no tenemos aún una teoría final, y es probable que tardemos en descubrirla. Pero de tanto en tanto tenemos indicios de que no estamos muy lejos de ella. A veces, en discusiones entre físicos, cuando queda de manifiesto que las ideas matemáticamente bellas son realmente relevantes para el mundo real, tenemos la sensación de que hay algo tras la pizarra, alguna verdad más profunda que prefigura una teoría final que hace que nuestras ideas funcionen tan bien.

Al hablar de una teoría final, miles de preguntas y comentarios vienen a la cabeza. ¿Qué quiere decir que un principio científico «explica» a otro? ¿Cómo sabemos que existe un punto de partida común para todas estas explicaciones? ¿Descubriremos alguna vez dicho punto? ¿Estamos muy cerca de ello? ¿Qué aspecto tendrá la teoría final? ¿Qué partes de nuestra física actual sobrevivirán en una teoría final? ¿Qué dirá sobre la vida y la conciencia? Y cuando tengamos nuestra teoría final, ¿qué pasará con la ciencia y el espíritu humano? Este capítulo apenas abordará estas cuestiones y

deja una respuesta más completa para el resto del libro.

El sueño de una teoría final no comenzó en el siglo xx. Puede ser rastreado en Occidente hasta una escuela que floreció un siglo antes del nacimiento de Sócrates en la ciudad griega de Mileto, donde el río Meandro desemboca en el mar Egeo. Realmente no sabemos mucho sobre la doctrina de los presocráticos, pero comentarios posteriores y los pocos fragmentos originales que nos han llegado sugieren que los milesios ya buscaban explicaciones de todos los fenómenos naturales en términos de un constituyente fundamental de la materia. Para Tales, el primero de estos milesios, la sustancia fundamental era el agua; para Anaxímenes, el último de esta escuela, la sustancia fundamental era el aire.

Hoy día Tales y Anaxímenes parecen lejanos. Mucha más admiración despierta ahora una escuela que surgió un siglo más tarde en Abdera, en la costa de Tracia. Allí, Demócrito y Leucipo enseñaban que toda la materia está compuesta de minúsculas partículas eternas que ellos llamaron átomos. (El atomismo tiene raíces en la metafísica india que se remonta a tiempos anteriores a Demócrito y Leucipo). Estos primitivos atomistas pueden parecer maravillosamente precoces, pero a mí no me parece muy importante que los milesios estuviesen «equivocados» y que la teoría atómica de Demócrito y Leucipo fuera en cierto sentido «correcta». Ninguno de los presocráticos, ni en Mileto ni en Abdera, tuvo ninguna idea similar a nuestra idea moderna de lo que una explicación científica acertada tendría que conseguir: la comprensión *cuantitativa* de los fenómenos. ¿Cuánto camino hemos avanzado hacia la comprensión

de por qué la naturaleza es como es cuando Tales o Demócrito nos dicen que una piedra está hecha de agua o de átomos, si aún no sabemos cómo calcular su densidad, su dureza o su conductividad eléctrica? Y, por supuesto, sin la capacidad de hacer predicciones cuantitativas nunca podríamos decir si Tales o Demócrito están en lo cierto.

Cuando en ocasiones he enseñado física en Texas y Harvard a estudiantes universitarios de humanidades, he tenido la sensación de que mi tarea más importante (y ciertamente la más difícil) era que los estudiantes experimentasen el poder de ser capaces de calcular en detalle lo que sucede en diversas circunstancias en diferentes sistemas físicos. Se les enseñaba a calcular la desviación de un rayo catódico o la caída de una gota de aceite, no porque éste sea el tipo de cosas que todo el mundo necesita calcular sino porque al hacer estos cálculos podían experimentar por sí mismos lo que realmente significan los principios de la física. Nuestro conocimiento de los principios que determinan estos y otros movimientos está en el corazón de la ciencia física y constituye una parte preciosa de nuestra civilización.

Desde este punto de vista, la «física» de Aristóteles no era mejor que las anteriores y menos alambicadas especulaciones de Tales y de Demócrito. En sus libros *Física* y *Sobre el cielo*, Aristóteles describe el movimiento de un proyectil como en parte natural y en parte forzado<sup>3</sup>; su movimiento natural, como sucede con todos los

---

<sup>3</sup> Siempre había creído que Aristóteles enseñaba que un proyectil viajaría en línea recta hasta que su impulso inicial se agotase y luego caería en vertical, pero fui incapaz de encontrar esta afirmación en ninguna parte de sus escritos. Un especialista en Aristóteles, Robert Hankinson,

cuerpos pesados, es hacia abajo, hacia el centro de las cosas, y su movimiento forzado es impartido por el aire, cuyo movimiento puede ser rastreado hasta allí donde comenzó el movimiento del proyectil. Pero ¿a qué velocidad viaja el proyectil y qué distancia recorre antes de llegar al suelo? Aristóteles no dice que los cálculos o las medidas sean demasiado difíciles o que no se sepa bastante sobre las leyes del movimiento para dar una descripción detallada del movimiento del proyectil. Si Aristóteles no ofrece una respuesta, ya sea correcta o equivocada, es porque él no considera que valga la pena plantearse estas cuestiones.

¿Y por qué vale la pena planteárselas? El lector, como Aristóteles, podría no estar muy preocupado por la velocidad con la que cae el proyectil; a mí tampoco me preocupa mucho. Lo realmente importante es que ahora conocemos los *principios*, las leyes de Newton del movimiento y de la gravitación y las ecuaciones de la aerodinámica, que determinan de forma precisa en qué lugar está el proyectil en cada instante de su vuelo. No estoy diciendo aquí que realmente podamos calcular de forma exacta cómo se mueve el proyectil. El flujo del aire tras una piedra irregular o tras las plumas de una flecha es complicado y, por consiguiente, nuestros cálculos serán probablemente sólo buenas aproximaciones, especialmente para flujos de aire que se hacen turbulentos. Existe también el problema de especificar las condiciones iniciales exactas. En cualquier caso, podemos utilizar nuestros principios físicos

---

de la Universidad de Texas, me asegura que en realidad Aristóteles no dijo nunca nada tan contrario a la observación y que esto es una tergiversación medieval de las opiniones de Aristóteles.

conocidos para resolver problemas más simples, como el movimiento de planetas en el espacio vacío o el flujo estacionario de aire alrededor de esferas o placas, lo suficientemente bien para asegurarnos de que realmente sabemos qué principios gobiernan el vuelo del proyectil. De modo análogo, no podemos calcular el curso de la evolución biológica, pero ahora conocemos bastante bien los principios que la gobiernan.

Ésta es una distinción importante que tiende a confundirse en las discusiones sobre el significado o la existencia de leyes finales de la naturaleza. Cuando decimos que una verdad explica otra, como por ejemplo que los principios físicos (las reglas de la mecánica cuántica) que gobiernan los electrones en campos eléctricos explican las leyes de la química, no estamos diciendo necesariamente que podemos deducir en la práctica las verdades que afirmamos que han sido explicadas. A veces podemos completar la deducción, como sucede en el caso de la molécula de hidrógeno sencilla. Otras veces el problema es demasiado complicado para nosotros. Al hablar de este modo de las explicaciones científicas, estamos considerando no lo que los científicos deducen realmente, sino una necesidad presente en la propia naturaleza. Por ejemplo, incluso antes de que los físicos y los astrónomos aprendieran en el siglo XIX cómo tener en cuenta la atracción mutua entre los planetas en los cálculos aproximados de sus movimientos, ellos podían estar razonablemente seguros de que los planetas se mueven como lo hacen debido a que están gobernados por las leyes de Newton del movimiento y la gravitación, u otras leyes más exactas a las que las



leyes de Newton sean una aproximación. Hoy día, incluso aunque no podamos predecir todo lo que los químicos pueden observar, creemos que los átomos se comportan como lo hacen en las reacciones químicas debido a que los principios físicos que gobiernan los electrones y las fuerzas eléctricas en el interior de los átomos no dejan libertad para que los átomos se comporten de cualquier otra forma.

Éste es un punto delicado, en parte porque resulta embarazoso decir que un hecho explica otro sin que personas reales hagan realmente las deducciones. Pero creo que tenemos que hablar de este modo porque de *esto* es de lo que trata nuestra ciencia: el descubrimiento de las explicaciones incorporadas en la estructura lógica de la naturaleza. Por supuesto, confiamos mucho más en que tenemos las explicaciones correctas cuando somos realmente capaces de llevar a cabo *algunos* cálculos y comparar los resultados con la observación: si no de la química de las proteínas, al menos de la química del hidrógeno.

Incluso si los griegos no se plantearon nuestro objetivo de una comprensión global y cuantitativa de la naturaleza, el razonamiento cuantitativo exacto no fue ciertamente desconocido en el mundo antiguo. Durante milenios los pueblos han conocido las reglas de la aritmética y la geometría plana y las grandes periodicidades del Sol, la Luna y las estrellas, incluyendo sutilezas tales como la precesión de los equinoccios. Además de esto, hubo un florecimiento de la ciencia matemática después de Aristóteles, durante la era helenística, que abarca el período comprendido entre las conquistas

de Alejandro, el pupilo de Aristóteles, hasta la dominación del mundo griego por Roma. Cuando yo era un estudiante universitario de filosofía sentí cierto malestar al oír que los filósofos helénicos como Tales o Demócrito se llamaban físicos; pero cuando llegamos a los grandes helenísticos, a Arquímedes en Siracusa descubriendo las leyes de la flotación o Eratóstenes en Alejandría midiendo la circunferencia de la Tierra, me sentí en familia entre mis colegas científicos: nada semejante a la ciencia helenística se había visto en ninguna parte del mundo hasta la aparición de la ciencia moderna en Europa en el siglo XVII.

Pero, a pesar de toda su brillantez, los filósofos naturales helenísticos nunca se aproximaron a la idea de un cuerpo de leyes que regularía exactamente *toda* la naturaleza. En realidad, la palabra ley raramente fue usada en la Antigüedad (y nunca por Aristóteles) excepto en su sentido original de leyes humanas o divinas que gobiernan la conducta humana<sup>i</sup>. (Es cierto que la palabra astronomía deriva de las palabras griegas *astron*, para estrella, y *nomos*, para ley, pero este término fue menos usual en la Antigüedad para designar la ciencia de los cielos que la palabra astrología). Sólo con Galileo, Kepler y Descartes en el siglo XVII encontramos la noción moderna de leyes de la naturaleza.

El historiador del mundo clásico Peter Green piensa que la culpa de las limitaciones en la ciencia griega se debe en gran parte al persistente esnobismo intelectual de los griegos, con su preferencia por la estática sobre la dinámica y por la contemplación sobre la tecnología, excepto la tecnología militar<sup>ii</sup>. Los primeros tres reyes de

la Alejandría helenística apoyaron la investigación sobre el vuelo de proyectiles debido a sus aplicaciones militares, pero para los griegos habría parecido inapropiado aplicar razonamientos exactos a algo tan banal como el proceso por el que una bola rueda por un plano inclinado, el problema que iluminó las leyes del movimiento de Galileo. La ciencia moderna tiene sus propios esnobismos: los biólogos prestan más atención a los genes que a los juanetes, y los físicos prefieren estudiar colisiones protón-protón a 20 billones de voltios que a 20 voltios. Pero se trata de esnobismos tácticos, basados en la apreciación (correcta o equivocada) de que algunos fenómenos resultan ser más reveladores que otros; tales juicios no reflejan una convicción de que algunos fenómenos sean más importantes que otros.

El sueño moderno de una teoría final empezó realmente con Isaac Newton. El razonamiento científico cuantitativo no había desaparecido realmente, y en la época de Newton había sido revitalizado principalmente por Galileo, pero Newton fue capaz de explicar tantas cosas con sus leyes del movimiento y su ley de la gravitación universal, desde las órbitas de los planetas y satélites hasta el ascenso y descenso de las mareas y las manzanas, que por primera vez él debió haber intuido la posibilidad de una teoría explicativa realmente global. Las esperanzas de Newton fueron expresadas en el prefacio a la primera edición de su gran libro, los *Principia*: «Espero que podamos derivar el resto de los fenómenos de la naturaleza [es decir, los fenómenos no tratados en los *Principia*] mediante el mismo tipo de razonamiento aplicado a los principios

mecánicos. Pues estoy inducido por muchas razones a sospechar que todos ellos pueden depender de ciertas fuerzas». Veinte años después, Newton describió en la *Óptica* cómo pensaba que su programa podría ser desarrollado:

Ahora las más pequeñas partículas de la materia se adhieren mediante las más fuertes atracciones, y componen partículas más grandes de virtud más débil; y muchas de éstas pueden adherirse y componer partículas más grandes cuya virtud es aún más débil, y así sucesivamente en diversas etapas hasta que la progresión termina en las partículas más grandes de las que dependen las operaciones de la química y los colores de los cuerpos naturales, y que adhiriéndose a su vez componen cuerpos de una magnitud apreciable. Existen así agentes en la naturaleza capaces de hacer que las partículas de los cuerpos se adhieran por muy fuertes atracciones. Y encontrarlas es la tarea de la filosofía experimental<sup>4</sup>.

El gran ejemplo de Newton dio lugar, especialmente en Inglaterra, a un estilo característico de explicación científica: la materia se concibe como compuesta de minúsculas partículas inmutables; las partículas interaccionan a través de «ciertas fuerzas», de las que la gravitación es sólo un tipo particular; conociendo las posiciones y las velocidades de estas partículas en cualquier instante, y sabiendo cómo calcular las fuerzas entre ellas, uno puede utilizar las leyes del movimiento para predecir dónde estarán en cualquier momento posterior. Todavía es frecuente enseñar de esta manera la física a los estudiantes de primer curso. Lamentablemente, a pesar de los

---

<sup>4</sup> Agradezco a Bengt Nagel el haberme sugerido la utilización de esta cita.

éxitos posteriores de la física de estilo newtoniano, fue un callejón sin salida.

Después de todo, el mundo es un lugar complicado. A medida que los científicos aprendían más sobre la química, la luz, la electricidad y el calor en los siglos XVIII y XIX, la posibilidad de una explicación según las líneas newtonianas debió parecer más y más remota. En particular, para explicar las reacciones químicas y las afinidades tratando los átomos como partículas newtonianas que se mueven bajo la influencia de sus atracciones y repulsiones mutuas, los físicos habrían tenido que formular tantas hipótesis arbitrarias sobre los átomos y las fuerzas que nada realmente podría haberse conseguido con ello.

En cualquier caso, hacia la década de 1890 una singular sensación de completación se había extendido entre muchos científicos. Entre las leyendas de la ciencia figura una historia apócrifa sobre cierto físico que, hacia final de siglo, proclamó que la física estaba a punto de ser completa, y que ya no quedaba nada por hacer salvo extender las medidas a unas pocas cifras decimales más. La historia parece tener su origen en un comentario hecho en 1894 en una charla en la Universidad de Chicago a cargo del físico experimental norteamericano Albert Michelson:

Aunque siempre es aventurado afirmar que el futuro de la ciencia física no reserva ninguna maravilla más sorprendente que las del pasado, parece probable que la mayoría de los grandes principios subyacentes han sido firmemente establecidos y que los avances posteriores habrán de buscarse principalmente en la rigurosa

aplicación de estos principios a todos los fenómenos de los que tengamos noticia... Un eminente físico ha comentado que las futuras verdades de la Ciencia Física tendrán que ser buscadas en la sexta cifra decimal.

Robert Andrews Millikan, otro físico experimental norteamericano, estaba entre la audiencia de Chicago durante la conferencia de Michelson y conjeturó que el «eminente físico» al que Michelson se refería era el influyente físico escocés William Thomson, lord Kelvin<sup>iii</sup>. Un amigo<sup>5</sup> me ha contado que cuando él era estudiante en Cambridge, a finales de los años cuarenta, solía citarse a Kelvin por haber dicho que ya no había nada nuevo que descubrir en física y que todo lo que quedaba era hacer medidas cada vez más precisas.

Yo no he podido encontrar este comentario en la recopilación de las conferencias de Kelvin, pero existen muchos otros indicios acerca de una muy extendida, aunque no universal, sensación de complacencia científica a finales del siglo XIX<sup>iv</sup>. Cuando el joven Max Planck ingresó en la Universidad de Múnich en 1875, el profesor de física, Philip Jolly, le previno contra el estudio de la ciencia. Según Jolly, no quedaba nada por descubrir. Millikan recibió un consejo similar:

En 1894 —recordaba— yo vivía en una habitación en un quinto piso de la calle 64, una manzana al oeste de Broadway, con otros cuatro estudiantes licenciados en Columbia, uno médico y otros tres que trabajaban en sociología y ciencia política, y continuamente se metían conmigo por persistir en el estudio de un tema «acabado», sí,

---

<sup>5</sup> El físico Abdus Salam.

un «tema muerto», como la física, cuando el nuevo, «vivo» campo de las ciencias sociales comenzaba a abrirse.

Con frecuencia estos ejemplos de la complacencia del siglo XIX se nos lanzan como advertencia a quienes nos atrevemos en el siglo XX a hablar de una teoría final. Esto más bien confunde el sentido de estos comentarios autocomplacientes. Michelson y Jolly, y los compañeros de piso de Millikan, posiblemente no podían pensar que la naturaleza de la atracción química hubiera sido satisfactoriamente explicada por los físicos, y mucho menos que el mecanismo de la herencia hubiera sido satisfactoriamente explicado por los químicos. Quienes hicieron tales comentarios sólo pudieron haberlos hecho en la medida en que habían abandonado el viejo sueño de Newton y sus seguidores según el cual la química y todas las demás ciencias serían comprendidas en términos de fuerzas físicas; para ellos, la química y la física habían llegado a ser ciencias en pie de igualdad, cada una de ellas a punto de completarse por separado. Cualquiera que fuese la extensión que había alcanzado este sentido de compleción en la ciencia de finales del siglo XIX, solamente representaba la complacencia que acompaña a una ambición que ha ido a menor.

Pero las cosas iban a cambiar muy rápidamente. Para un físico el siglo xx comienza en 1895, con el inesperado descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Roentgen. No es sólo que los rayos X fueran en sí mismos muy importantes; además de esto, su descubrimiento animó a los físicos a creer que existían muchas cosas nuevas por descubrir, especialmente en el estudio de los diversos tipos de

radiación. Y los descubrimientos vinieron en rápida sucesión. En París, en 1896, Henri Becquerel descubrió la radiactividad. En Cambridge, en 1897, J. J. Thomson midió la desviación de los rayos catódicos en campos eléctricos y magnéticos e interpretó los resultados en términos de una partícula fundamental, el electrón, presente en toda la materia y no sólo en los rayos catódicos. En Berna, en 1905, Albert Einstein (todavía al margen de un puesto académico) presentó un nuevo concepto de espacio y tiempo en su teoría de la relatividad especial, sugirió una nueva forma de demostrar la existencia de los átomos e interpretó el trabajo anterior de Max Planck sobre la radiación térmica en términos de una nueva partícula elemental, la partícula de luz posteriormente denominada fotón. Un poco más tarde, en 1911, Ernest Rutherford utilizó los resultados de experimentos con elementos radiactivos en su laboratorio de Manchester para inferir que los átomos constan de pequeños núcleos masivos rodeados por nubes de electrones. Y en 1913, el danés Niels Bohr utilizó este modelo atómico y la idea de fotón de Einstein para explicar el espectro del átomo más sencillo, el átomo de hidrógeno. La complacencia dio paso a la excitación; los físicos empezaron a sentir que una teoría final que unificara al menos toda la ciencia física podría pronto ser encontrada.

Ya en 1902, el otrora complaciente Michelson podía proclamar:

No parece muy lejano el día en que las líneas convergentes de muchas regiones de pensamiento aparentemente remotas se encontrarán en... una base común. Entonces la naturaleza de los átomos y de las fuerzas que intervienen en su enlace químico, las



interacciones entre estos átomos y el éter indiferenciado tal como se manifiesta en los fenómenos de la luz y la electricidad, las estructuras de las moléculas y de los sistemas moleculares de los que los átomos son unidades, la explicación de la cohesión, la elasticidad y la gravitación, todo esto será reunido en un simple y compacto cuerpo de conocimiento científico<sup>v</sup>.

Donde antes Michelson había pensado que la física ya estaba completa porque no esperaba que la física explicara la química, ahora él esperaba una compleción muy diferente en un futuro próximo que englobara la química y la física al mismo tiempo.

Esto era todavía un poco prematuro. El sueño de una teoría final unificadora empezó a tomar forma realmente por primera vez a mediados de los años veinte, con el descubrimiento de la mecánica cuántica. Ésta era una herramienta nueva y poco familiar para la física que utilizaba funciones de onda y probabilidades en lugar de las partículas y fuerzas de la mecánica newtoniana. La mecánica cuántica hizo posible repentinamente calcular las propiedades no sólo de los átomos individuales y su interacción con la radiación sino también de los átomos combinados en moléculas. Al final había quedado claro que los fenómenos químicos son lo que son debido a las interacciones eléctricas de los electrones y los núcleos atómicos. Esto no significa que los cursos de química universitarios empezasen a ser impartidos por profesores de física o que la Sociedad Norteamericana de Química solicitase ser absorbida por la Sociedad Norteamericana de Física. Es bastante difícil utilizar las ecuaciones de la mecánica cuántica para calcular la fuerza del

enlace de dos átomos de hidrógeno en la más simple molécula de hidrógeno; se necesita la experiencia especial y las intuiciones de los químicos para tratar moléculas complicadas, especialmente las moléculas muy complejas que encontramos en biología, y la forma en que reaccionan en diversas circunstancias. Pero los éxitos de la mecánica cuántica al calcular las propiedades de moléculas muy simples dejaban claro que la química funciona como lo hace debido a las leyes de la física. Paul Dirac, uno de los fundadores de la nueva mecánica cuántica, anunciaba de forma triunfal en 1929 que «de este modo, las leyes físicas subyacentes necesarias para la teoría matemática de una gran parte de la física y de la totalidad de la química son completamente conocidas, y la dificultad radica solamente en que la aplicación de estas leyes conduce a ecuaciones demasiado difíciles de resolver<sup>vi</sup>».

Poco después iba a aparecer un nuevo y singular problema. Los primeros cálculos mecanocuánticos de las energías atómicas habían dado buenos resultados conforme a los experimentos. Pero cuando la mecánica cuántica se aplicó no sólo a los electrones en los átomos sino también a los campos eléctricos y magnéticos que dichos electrones producen, resultó que el átomo ¡tenía una energía infinita! Otros infinitos aparecieron en otros cálculos y, durante cuatro décadas, este resultado absurdo se presentó como el mayor obstáculo para el progreso de la física. Finalmente, el problema de los infinitos resultó no ser un desastre, sino más bien una de las mejores razones para el optimismo con respecto al progreso hacia una teoría final. Cuando se definen con el debido cuidado las

masas, las cargas eléctricas y otras constantes, todos los infinitos se cancelan, pero *solamente* en teorías de cierto tipo especial. De este modo, podemos vernos matemáticamente abocados a parte o a toda una teoría final como la única forma de evitar estos infinitos. De hecho, la nueva y esotérica teoría de cuerdas puede ya haber proporcionado la única forma de evitar infinitos cuando reconciliamos la relatividad (incluyendo la relatividad general, la teoría de la gravitación de Einstein) con la mecánica cuántica. Si es así, ella será una parte importante de cualquier teoría final.

No pretendo sugerir que la teoría final será deducida a partir de puras matemáticas. Después de todo, ¿por qué tendríamos que creer que la relatividad o la mecánica cuántica son lógicamente inevitables? Opino que nuestra mejor esperanza consiste en identificar la teoría final como una que es tan rígida que no puede ser mínimamente modificada sin introducir absurdos lógicos como las energías infinitas.

Existe otra razón adicional para el optimismo en el hecho peculiar de que el progreso en física a menudo es guiado por apreciaciones que sólo pueden ser calificadas de estéticas. Esto es muy singular. ¿Por qué la sensación que tiene un físico de que una teoría es más bella que otra debería ser una guía útil en la investigación científica? Existen varias razones posibles para ello, pero una de ellas es específica de la física de partículas elementales: la belleza de nuestras teorías actuales puede que sea «sólo un sueño» del tipo de belleza que nos aguarda en la teoría final.

En nuestro siglo fue Albert Einstein quien más explícitamente

persiguió el objetivo de una teoría final. Como dice su biógrafo Abraham Pais, «Einstein es una figura típica del Antiguo Testamento, con la actitud yahvista de que existe una ley y debemos descubrirla<sup>vii</sup>». Los últimos treinta años de la vida de Einstein estuvieron dedicados principalmente a la búsqueda de una llamada teoría del campo unificado que unificara la teoría del electromagnetismo de James Clerk Maxwell con la teoría de la relatividad general, la teoría de la gravitación de Einstein. El intento de Einstein no tuvo éxito y, visto en retrospectiva, podemos ver ahora que estaba mal planteado. No es sólo que Einstein rechazara la mecánica cuántica, sino que el ámbito de su esfuerzo era demasiado estrecho. El electromagnetismo y la gravitación resultan ser las únicas fuerzas fundamentales que son manifiestas en la vida cotidiana (y las únicas fuerzas que se conocían cuando Einstein era joven), pero existen otras fuerzas en la naturaleza, que incluyen las fuerzas nucleares débil y fuerte. De hecho, los progresos que se han realizado hacia la unificación han consistido en unificar la teoría de Maxwell de la fuerza electromagnética con la teoría de la fuerza nuclear débil, y no con la teoría de la gravitación donde el problema de los infinitos ha sido mucho más difícil de resolver. De todas formas, la lucha de Einstein es nuestra lucha actual. Es la búsqueda de una teoría final.

Hablar de una teoría final parece irritar a algunos filósofos y científicos. Probablemente uno sea acusado de algo horrible, como de reduccionismo o incluso de imperialismo físico. Esto es en parte una reacción contra los diversos significados estúpidos que se le

pueden dar a una teoría final como, por ejemplo, el de que el descubrimiento de una teoría final en física supondría el fin de la ciencia. Por supuesto, una teoría final no acabará con la investigación científica, ni siquiera con la investigación científica básica y ni tan siquiera con la investigación científica básica en física. Fenómenos maravillosos, desde la turbulencia hasta el pensamiento, seguirán necesitando explicación sea cual sea la teoría final descubierta. El descubrimiento de una teoría final en física no nos ayudará mucho necesariamente para hacer progresos en la comprensión de estos fenómenos (aunque pueda hacerlo con alguno). Una teoría final será final en un solo sentido: supondrá un fin para cierto tipo de ciencia, la vieja búsqueda de aquellos principios que no pueden ser explicados en términos de principios más profundos.

## Capítulo 1

### Sobre un trozo de tiza

*BUFÓN:... La razón por la que las siete estrellas no son más que siete es una buena razón.*

*LEAR: ¿Por qué no son ocho?*

*BUFÓN: Así es, en verdad. Tú serías un buen bufón.*

*WILLIAM SHAKESPEARE, El rey Lear*

Los científicos han descubierto muchas cosas peculiares y muchas cosas bellas. Pero quizá la cosa más bella y peculiar que han descubierto es la estructura de la propia ciencia. Nuestros descubrimientos científicos no son hechos aislados e independientes; una generalización científica encuentra su explicación en otra que, a su vez, es explicada por otra más. Remontándonos hacia la fuente de estas flechas explicativas hemos descubierto una estructura sorprendentemente convergente: esto es quizá lo más profundo que hemos aprendido acerca del universo.

Consideremos un trozo de tiza. La tiza es una sustancia familiar a mucha gente (y especialmente familiar a los físicos, que se comunican a través de pizarras), pero yo utilizo aquí la tiza como ejemplo porque fue el tema de una polémica famosa en la historia de la ciencia. En 1868 la British Association celebró su reunión

anual en Norwich, gran ciudad episcopal y capital del condado, al este de Inglaterra. Era un momento excitante para los científicos y estudiosos reunidos en Norwich. La atención pública estaba dirigida hacia la ciencia, no sólo debido a que su importancia para la tecnología estaba resultando inequívoca sino, en mayor medida, debido a que la ciencia estaba cambiando el modo de pensar de la gente acerca del mundo y de su lugar en él. Sobre todo, la publicación, nueve años atrás, del libro de Darwin *Sobre el origen de las especies por medio de la selección natural* había situado a la ciencia en abierta oposición a la religión dominante de la época. En la reunión estaba presente Thomas Henry Huxley, famoso anatomista y polemista feroz, conocido por sus contemporáneos como el «bulldog de Darwin». Tal como era su costumbre, Huxley aprovechó la oportunidad para hablar a los trabajadores de la ciudad. El título de su conferencia era «Sobre un trozo de tiza<sup>viii</sup>».

Puedo imaginarme a Huxley de pie en el estrado sosteniendo realmente un trozo de tiza, extraído quizá de las formaciones calizas del subsuelo de Norwich o prestado por algún amable carpintero o profesor. Comenzó describiendo cómo el estrato calizo, a cientos de pies de profundidad, se extiende no sólo bajo gran parte de Inglaterra sino también bajo Europa y el Próximo Oriente hasta el Asia Central. La tiza es en esencia un compuesto químico sencillo, «carbonato de cal», o en términos modernos carbonato cálcico, aunque un examen microscópico revela que consta de innumerables conchas fósiles de animales minúsculos que vivían en los mares antiguos que otrora cubrieron Europa. Huxley describió vívidamente

cómo durante millones de años estos minúsculos cuerpos se fueron depositando en el fondo del mar para ser comprimidos en la caliza, y cómo atrapados aquí y allí en la caliza existen fósiles de animales mayores que los cocodrilos, animales cuyas diferencias con respecto a sus homólogos modernos se acentúan a medida que descendemos a niveles cada vez más profundos en la caliza, lo que indica que no han dejado de evolucionar durante los millones de años en que la caliza se estuvo sedimentando.

Huxley estaba tratando de convencer a los trabajadores de Norwich de que el mundo es mucho más viejo que los 6000 años que concedían los estudiosos de la Biblia, y que nuevas especies vivientes han aparecido y evolucionado desde su comienzo. Estas cuestiones están ahora firmemente establecidas; nadie con un mínimo conocimiento de la ciencia dudará de la antigüedad de la Tierra o de la realidad de la evolución. El punto que quiero señalar aquí no se refiere a ninguna cuestión específica del conocimiento científico sino al modo en que todas ellas se relacionan. Para ello, empezaré como lo hizo Huxley, con un trozo de tiza.

La tiza es blanca. *¿Por qué?* Una respuesta inmediata sería decir que es blanca porque no tiene otro color. Ésta es una respuesta que hubiera gustado al bufón de Lear, pero, de hecho, no está tan lejos de la verdad. Ya en tiempos de Huxley se sabía que cada color del arco iris está asociado con luz de una determinada longitud de onda: las mayores longitudes de onda corresponden a luz en el extremo rojo del espectro, y las longitudes de onda más cortas, a luz en el azul o el violeta. Se sabía que la luz blanca es una mezcolanza



de luz de muchas longitudes de onda diferentes. Cuando la luz incide sobre una sustancia opaca como la tiza, sólo parte de ella es reflejada; el resto es absorbida. Una sustancia que tiene un color definido, como el azul verdoso de muchos compuestos de cobre (por ejemplo, los fosfatos de aluminio y cobre de la turquesa) o el color violeta de los compuestos de cromo, tiene ese color debido a que la sustancia tiende a absorber fuertemente la luz de ciertas longitudes de onda; el color que vemos en la luz que la sustancia refleja es el color asociado con la luz de las longitudes de onda que *no* son fuertemente absorbidas. Para el carbonato cálcico del que la tiza está compuesta resulta que sólo es fuertemente absorbida la luz correspondiente a las longitudes de onda del infrarrojo y el ultravioleta que, en cualquier caso, son invisibles. Por lo tanto, la luz reflejada por un trozo de tiza tiene aproximadamente la misma distribución de longitudes de onda en el espectro visible que la luz que la ilumina. Esto es lo que produce la sensación de blancura, ya sea en las nubes, la nieve o la tiza.

*¿Por qué?* ¿Por qué algunas sustancias absorben fuertemente la luz visible de longitudes de onda concretas y otras no lo hacen? La respuesta está relacionada con las energías de los átomos y de la luz. Esto empezó a ser entendido con el trabajo de Albert Einstein y Niels Bohr en las dos primeras décadas de este siglo. Tal como Einstein fue el primero en comprender en 1905, un rayo de luz consiste en un chorro de un enorme número de partículas posteriormente denominadas *fotones*. Los fotones no tienen masa ni carga eléctrica, pero cada fotón tiene una energía definida, que es

inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz. Bohr propuso en 1913 que los átomos y las moléculas sólo pueden existir en ciertos *estados* definidos, configuraciones estables que tienen una energía definida. Aunque los átomos son asimilados a menudo a pequeños sistemas solares, existe una diferencia crucial. En el Sistema Solar podríamos dar a cualquier planeta una cantidad un poco mayor o un poco menor de energía alejándolo o acercándolo ligeramente al Sol, pero, por el contrario, los estados de un átomo son *discretos*: no podemos cambiar las energías de los átomos salvo en ciertas cantidades definidas. Normalmente, un átomo o una molécula está en el estado de energía más baja. Cuando un átomo o una molécula absorbe luz, salta de un estado de menor energía a otro de mayor energía (y viceversa cuando la luz es emitida). En conjunto, estas ideas de Einstein y Bohr nos dicen que la luz puede ser absorbida por un átomo o una molécula sólo si la longitud de onda de la luz tiene alguno de ciertos valores definidos. Éstas son las longitudes de onda correspondientes a fotones con energías que son precisamente las diferencias entre la energía del estado normal del átomo o molécula y uno de sus estados de energía más alta. Si no fuera así, la energía no se conservaría cuando el fotón es absorbido por el átomo o la molécula. Los compuestos típicos de cobre son de color azul verdoso porque existe un estado particular del átomo de cobre con una energía que es 2 voltios más alta que la energía del estado normal del átomo, y así resulta excepcionalmente fácil para el átomo saltar a dicho estado absorbiendo un fotón con

una energía de 2 voltios<sup>6</sup>. Este fotón tiene una longitud de onda de 0,62 micras, correspondiente a un color anaranjado, de modo que la absorción de estos fotones deja un resto de luz reflejada azul verdosa<sup>7</sup>. (Esto no es simplemente una forma complicada de decir que estos compuestos son de color azul verdoso; la misma pauta de energías atómicas se manifiesta cuando cedemos energía al átomo de cobre por medios diferentes, por ejemplo mediante un haz de electrones). La tiza es blanca porque las moléculas de las que está compuesta no tienen ningún estado al que resulte particularmente fácil saltar absorbiendo fotones de cualquier color dentro de la luz visible.

*¿Por qué?* ¿Por qué los átomos y las moléculas se dan en estados discretos, cada uno de ellos con una energía definida? ¿Por qué estos valores de la energía son los que son? ¿Por qué la luz se da en partículas individuales, cada una de ellas con una energía inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz? ¿Y por qué existen ciertos estados de los átomos y moléculas a los que resulta particularmente fácil saltar mediante absorción de fotones? No fue posible comprender estas propiedades de la luz o de los átomos o de las moléculas hasta el desarrollo, a mediados de los años veinte, de una nueva herramienta para la física conocida como mecánica cuántica. Las partículas en un átomo o una molécula se

---

<sup>6</sup> Cuando se utiliza como unidad de energía, un voltio se define como la energía comunicada a un electrón cuando es impulsado a través de un cable conductor mediante una batería eléctrica de 1 voltio. (Cuando se utiliza en este sentido sería más correcto denominarlo «electrónvoltio». Pero, como suele hacerse en física, simplemente le llamaré un voltio). Una micra es una millonésima de metro.

<sup>7</sup> El color exacto varía de un compuesto de cobre a otro debido a que las energías de los estados atómicos se ven afectadas por los átomos vecinos.

describen en mecánica cuántica mediante lo que se denomina una función de onda. Una función de onda se comporta de un modo similar a una onda de luz o de sonido, pero su amplitud (en realidad el cuadrado de su amplitud) da la probabilidad de encontrar las partículas en una posición dada. Del mismo modo que el aire en un tubo de órgano puede vibrar sólo en ciertos modos definidos de vibración, cada uno con su propia longitud de onda, así también la función de onda de las partículas en un átomo o una molécula puede aparecer sólo en ciertos modos o estados cuánticos, cada uno de ellos con su propia energía. Cuando se aplican las ecuaciones de la mecánica cuántica al átomo de cobre se encuentra que uno de los electrones en una órbita externa de alta energía del átomo está débilmente ligado y puede ser lanzado fácilmente, por absorción de luz visible, hasta la siguiente órbita más alta. Los cálculos mecanocuánticos muestran que las energías del átomo en estos dos estados difieren en 2 voltios, que es precisamente la energía de un fotón de luz anaranjada<sup>8</sup>. Por el contrario, las moléculas de carbonato cálcico en un trozo de tiza no tienen ninguno de estos electrones débilmente ligados que pudiera absorber fotones de una longitud de onda particular. Por lo que respecta a los fotones, sus propiedades se explican aplicando de un modo análogo los principios de la mecánica cuántica a la propia luz. Resulta que la luz, al igual que los átomos, puede existir solamente en ciertos estados cuánticos de energía definida. Por ejemplo, la luz

---

<sup>8</sup> En un metal dichos electrones externos abandonan los átomos individuales y fluyen entre ellos, de modo que no hay una tendencia especial del cobre metálico a absorber fotones de luz anaranjada y, por esta razón, no es azul verdoso.

anaranjada con una longitud de onda de 0,62 micras puede existir solamente en estados con energías iguales a cero, 2 voltios, 4 voltios, 6 voltios, y así sucesivamente, que interpretamos como estados que contienen 0, 1, 2, 3 o más fotones, teniendo cada fotón una energía de precisamente 2 voltios.

¿Por qué? ¿Por qué las ecuaciones mecanocuánticas que gobiernan las partículas en los átomos son las que son? ¿Por qué la materia consta de estas partículas, los electrones y los núcleos atómicos? Y ya que estamos con esto, ¿por qué existe algo tal como la luz? Muchas de estas cosas resultaban más bien misteriosas en los años veinte y treinta cuando la mecánica cuántica se aplicó por primera vez a los átomos y a la luz, y sólo han sido razonablemente bien comprendidas en los últimos 15 años aproximadamente, con el éxito de lo que se denomina el *modelo estándar* de las partículas elementales y de las fuerzas. Un requisito clave para este nuevo entendimiento fue la reconciliación en los años cuarenta de la mecánica cuántica con la otra gran revolución en la física del siglo xx, la teoría de la relatividad de Einstein. Los principios de la relatividad y de la mecánica cuántica son casi mutuamente incompatibles y sólo pueden coexistir en una limitada clase de teorías. En la mecánica cuántica no relativista de los años veinte podíamos imaginar casi cualquier tipo de fuerzas entre electrones y núcleos, pero, como veremos, esto ya no es así en la teoría relativista: las fuerzas entre partículas sólo pueden surgir del intercambio de otras partículas. Además, todas estas partículas son paquetes de energía, o *cuantos*, de varios tipos de campos. Un

campo tal como un campo eléctrico o magnético es un tipo de tensión en el espacio, algo parecido a los diversos tipos de tensiones que son posibles dentro de un cuerpo sólido, aunque con la diferencia de que un campo es una tensión en el propio espacio. Existe un tipo de campo para cada especie de partícula elemental: existe un campo electrónico en el modelo estándar cuyos cuantos son electrones; existe un campo electromagnético (consistente en campos eléctrico y magnético), cuyos cuantos son los fotones; no existe campo para los núcleos atómicos, o para las partículas (conocidas como protones y neutrones) de las que están compuestos los núcleos, pero existen campos para varios tipos de partículas llamadas quarks, de las cuales se componen los protones y los neutrones; y existen algunos otros pocos campos en los que no necesito entrar ahora. Las ecuaciones de una teoría de campos como el modelo estándar no tratan con partículas sino con campos; las partículas aparecen como manifestaciones de dichos campos. La razón de que la materia ordinaria esté compuesta de electrones, protones y neutrones es sencillamente que todas las demás partículas masivas son violentamente inestables. El modelo estándar merece la calificación de explicación porque no es simplemente lo que los desguazadores de ordenadores llaman un *kludge*, un montón de retazos empalmados de cualquier forma que los haga funcionar. Antes bien, la estructura del modelo estándar queda esencialmente fijada una vez que se especifica la lista de campos que debería contener y los principios generales (como los principios de la relatividad y de la mecánica cuántica) que gobiernan

sus interacciones.

¿Por qué? ¿Por qué el mundo consta sólo de estos campos: los campos de los quarks, del electrón, del fotón, y demás? ¿Por qué estos campos tienen las propiedades supuestas en el modelo estándar? Y ya que estamos en esto, ¿por qué la naturaleza obedece los principios de la relatividad y de la mecánica cuántica? Lo siento, estas preguntas todavía no tienen respuesta. Comentando el estatus actual de la física, el físico teórico de Princeton David Gross enumeraba una lista de cuestiones abiertas: «Ahora que comprendemos cómo funcionan, estamos empezando a preguntarnos por qué existen quarks y leptones, por qué la estructura de la materia se replica en tres generaciones de quarks y leptones, por qué todas las fuerzas se deben a simetrías gauge locales. ¿Por qué, por qué, por qué<sup>ix</sup>?». (Los términos utilizados en la lista de «por qué» de Gross se explican en capítulos posteriores). Es precisamente la esperanza de responder a estas preguntas lo que hace tan excitante la física de partículas elementales.

La expresión «por qué» es notoriamente equívoca. El filósofo Ernest Nagel enumera diez ejemplos de preguntas en las que «por qué» es utilizada en diez sentidos diferentes, tales como «¿Por qué el hielo flota en el agua?», «¿Por qué Casio urdió la muerte de César?» y «¿Por qué los seres humanos tienen pulmones<sup>x</sup>?». Inmediatamente vienen a la cabeza otros ejemplos en los que «por qué» está utilizado en otros sentidos, tales como «¿Por qué he nacido?». Aquí mi uso de «por qué» se parece al uso que tiene en la pregunta «¿Por qué el hielo flota en el agua?» y no pretende sugerir ningún sentido de propósito

consciente.

Incluso así, es un asunto delicado decir exactamente qué es lo que uno está haciendo cuando responde a una de estas preguntas. Afortunadamente, esto no es realmente necesario. La explicación científica es un modo de conducta que nos proporciona placer, como el amor o el arte. La mejor manera de comprender la naturaleza de la explicación científica es experimentar el gustillo particular que usted siente cuando alguien (preferiblemente usted mismo) ha conseguido explicar algo con éxito. No quiero decir que la explicación científica pueda ser perseguida sin ninguna limitación, como tampoco sucede con el amor o el arte. En los tres casos existe un modelo de verdad que hay que respetar, aunque por supuesto la verdad toma diferentes significados en la ciencia o en el amor o en el arte. Tampoco quiero decir que no haya ningún interés en tratar de formular algunas descripciones generales de cómo se hace la ciencia, sino solamente que esto no es realmente necesario en el trabajo de la ciencia, como tampoco lo es en el amor o el arte.

Tal como la he estado describiendo, la explicación científica tiene que ver evidentemente con la deducción de una verdad a partir de otra. Pero una explicación es algo más que una deducción, y también algo menos. Deducir simplemente un enunciado a partir de otro no constituye necesariamente una explicación, como vemos claramente en aquellos casos en que cualquiera de los dos enunciados puede ser deducido a partir del otro. Einstein infirió en 1905 la existencia de los fotones a partir de la fructífera teoría de la radiación térmica que había sido propuesta cinco años antes por



Max Planck; diecinueve años después, Satyendra Nath Bose demostró que la teoría de Planck podía ser deducida de la teoría de Einstein de los fotones. La explicación, a diferencia de la deducción, procede en una única *dirección*. Tenemos una sensación abrumadora de que la teoría fotónica de la luz es más fundamental que cualquier enunciado sobre la radiación térmica y, por consiguiente, es la explicación de las propiedades de la radiación térmica. Y, de la misma forma, aunque Newton derivó en parte sus famosas leyes del movimiento de las anteriores leyes de Kepler que describen el movimiento de los planetas en el Sistema Solar, decimos que las leyes de Newton explican las de Kepler, pero no a la inversa<sup>9</sup>.

Hablar de verdades más fundamentales pone nerviosos a los filósofos, Podemos decir que las verdades más fundamentales son aquellas que en cierto sentido son más comprensivas, aunque sobre esto también resulta difícil ser preciso. Pero los científicos estarían en el mal camino si tuvieran que limitarse a las nociones que han sido satisfactoriamente formuladas por los filósofos. Ningún físico en activo duda que las leyes de Newton sean más fundamentales que las de Kepler o que la teoría de Einstein de los fotones es más fundamental que la teoría de Planck de la radiación térmica.

Una explicación científica puede ser también algo menos que una

---

<sup>9</sup> Según las leyes de Kepler, las órbitas planetarias son elipses que tienen al Sol en un foco; la velocidad de cada planeta varía a medida que orbita alrededor del Sol, de tal forma que la recta que une el planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales; y los cuadrados de los períodos son proporcionales a los cubos de los diámetros mayores de las órbitas elípticas. Las leyes de Newton establecen que cada partícula en el universo atrae a cualquier otra partícula con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, y dictan cómo se mueve cualquier cuerpo bajo la influencia de cualquier fuerza dada.

deducción pues podemos decir que un hecho se explica por algún principio, aunque no podamos deducirlo a partir de dicho principio. Utilizando las reglas de la mecánica cuántica *podemos* deducir diversas propiedades de los átomos y las moléculas más sencillos e incluso estimar los niveles energéticos de moléculas complicadas, como las moléculas de carbonato cálcico en la tiza. El químico de Berkeley Henry Shaefer afirma que «cuando los métodos teóricos actuales se aplican inteligentemente a muchos problemas que involucran moléculas tan grandes como la naftalina, los resultados pueden ser tratados de la misma forma en que uno trata experimentos fiables<sup>xi</sup>». Pero nadie resuelve en realidad las ecuaciones de la mecánica cuántica para deducir la función de onda detallada o la energía exacta de moléculas realmente complicadas como las proteínas. Sin embargo, no dudamos de que las reglas de la mecánica «explican» las propiedades de tales moléculas. Esto se debe en parte a que podemos utilizar la mecánica cuántica para deducir las propiedades detalladas de sistemas más sencillos como las moléculas de hidrógeno, y también debido a que disponemos de reglas matemáticas que nos permitirían calcular todas las propiedades de cualquier molécula con la precisión deseada si tuviésemos un ordenador lo bastante grande y el suficiente tiempo de cálculo.

Podemos decir incluso que algo está explicado aun allí donde no tenemos seguridad de que alguien sea alguna vez capaz de deducirlo. Hoy día precisamente no sabemos cómo utilizar nuestro modelo estándar de las partículas elementales para calcular las

propiedades detalladas de los núcleos atómicos, y no estamos seguros de que sepamos alguna vez cómo hacer estos cálculos, incluso si dispusiéramos de una potencia de cálculo ilimitada<sup>10</sup>. (Esto se debe a que las fuerzas en el interior de los núcleos son demasiado intensas como para permitir el tipo de técnicas de cálculo que funcionan en el caso de los átomos o las moléculas). Sin embargo, no dudamos de que las propiedades de los núcleos atómicos son las que son debido a los principios conocidos del modelo estándar. Este «debido a» no tiene nada que ver con nuestra capacidad para deducir realmente algo, sino que refleja nuestra idea del orden de la naturaleza.

Ludwig Wittgenstein, al negar incluso la posibilidad de explicar cualquier hecho sobre la base de cualquier otro hecho, advertía que «en toda la visión moderna del mundo subyace el espejismo de que las llamadas leyes de la naturaleza son las explicaciones de los fenómenos de la naturaleza<sup>11</sup>». Tales advertencias me dejan frío.

---

<sup>10</sup> Algunos teóricos están estudiando la posibilidad de hacer cálculos que involucran fuerzas nucleares fuertes representando el espacio-tiempo como un retículo de puntos diferenciados, y utilizando ordenadores que operan en paralelo para seguir el valor de los campos en cada punto. Cabe esperar, aunque no es seguro, que mediante tales métodos podrán deducirse las propiedades de los núcleos a partir de los principios de la cromodinámica cuántica. Hasta el momento no ha sido posible siquiera calcular las masas de los protones y neutrones que componen los núcleos.

<sup>11</sup> L. Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus*, trad. D. F. Pears y B. F. McGuinness, Routledge, Londres, 1922, p. 181 [hay trad. cast.: *Tractatus Logico-Philosophicus*, ed. de Jacobo Muñoz e Isidoro Reguera, Alianza Editorial, Madrid, 1987. De hecho, en este punto se ha reproducido literalmente la traducción de la proposición 6371 de dicha edición castellana, que corrige ligeramente la traducción anterior de E. Tierno Galván (*N. del t.*)]. En una línea muy similar, un amigo inclinado hacia la filosofía, el profesor Philip Bobbitt de la Facultad de Derecho de la Universidad de Texas, me comentó. «Cuando le digo a un niño que pregunta por qué cae una manzana a la tierra que es debido a la gravedad, no estoy explicando nada. Las descripciones matemáticas del mundo físico que proporciona la física no son explicaciones...». Estoy de acuerdo con esto si todo lo que se entiende por gravedad es que existe una tendencia de los objetos pesados a caer hacia la tierra. Por el contrario, si por gravedad entendemos el complejo total de fenómenos descritos por las teorías de Newton y Einstein, fenómenos que incluyen los movimientos de las mareas, los planetas y las galaxias, entonces la respuesta de

Decir a un físico que las leyes de la naturaleza no son explicaciones de los fenómenos naturales es como decir a un tigre que está acechando a su presa que toda la carne es hierba. El hecho de que nosotros los científicos no sepamos cómo enunciar de una forma que los filósofos pudiesen aprobar qué es lo que estamos haciendo al buscar explicaciones científicas no significa que no estemos haciendo algo que valga la pena. Podríamos servirnos de la ayuda de los filósofos profesionales para comprender qué es lo que estamos haciendo, pero con su ayuda o sin ella seguiríamos haciéndolo.

Podríamos seguir una cadena similar de «por qué» para cada propiedad física de la tiza: su fragilidad, su densidad o su resistencia al paso de una corriente eléctrica. Pero tratemos de entrar en el laberinto de la explicación por una puerta diferente: considerando la química de la tiza. Como decía Huxley, la tiza es esencialmente carbonato de calcio, en términos modernos, carbonato cálcico. Huxley no lo decía exactamente así, pero probablemente él sabía que este compuesto químico contiene los elementos calcio, carbono y oxígeno en proporciones fijas (en peso) 40 por 100, 12 por 100 y 48 por 100, respectivamente.

*¿Por qué?* ¿Por qué encontramos un compuesto químico de calcio, carbono y oxígeno con estas proporciones precisas, pero no otros muchos con otras muchas proporciones? La respuesta fue proporcionada por los químicos en el siglo XIX en términos de una teoría de átomos; de hecho, lo fue antes de que hubiese cualquier evidencia experimental directa de la existencia de átomos. Los pesos

---

que la manzana cae debido a la gravedad ciertamente me parece una explicación. En cualquier caso, es así como la palabra «explicación» es utilizada por los científicos en activo.

de los átomos de calcio, carbono y oxígeno están en la proporción 40:12:16, y una molécula de carbonato cálcico consiste en un átomo de calcio, un átomo de carbono y *tres* átomos de oxígeno, de modo que los pesos de calcio, carbono y oxígeno en el carbonato cálcico están en la proporción 40:12:48.

*¿Por qué?* ¿Por qué los átomos de los diversos elementos tienen los pesos que observamos, y por qué las moléculas constan sólo de un cierto número de átomos de cada tipo? Ya era conocido en el siglo XIX que el número de los átomos de cada tipo en moléculas como la del carbonato cálcico, tenía que ver con las cargas eléctricas que los átomos de la molécula intercambian entre sí. En 1897 J. J. Thomson descubrió que estas cargas eléctricas son transportadas por partículas cargadas negativamente llamadas electrones, partículas que son mucho más ligeras que los átomos enteros y que fluyen por los cables en las corrientes eléctricas ordinarias. Un elemento se distingue de otro solamente por el número de electrones en el átomo correspondiente. Un electrón para el hidrógeno, seis para el carbono, ocho para el oxígeno, veinte para el calcio, y así sucesivamente. Cuando se aplican las reglas de la mecánica cuántica a los átomos de los que está compuesta la tiza se encuentra que los átomos de calcio y carbono ceden rápidamente dos y cuatro electrones respectivamente, y que los átomos de oxígeno toman dos electrones cada uno<sup>12</sup>. Así, los tres átomos de

---

<sup>12</sup> Los elementos más estables son aquéllos con un número de electrones que puede encajar perfectamente en capas completas; éstos son los gases nobles, helio (dos electrones), neón (diez electrones), argón (dieciocho electrones), y así sucesivamente. (Estos gases se denominan nobles porque, como resultado de la estabilidad de sus átomos, tienden a no participar en reacciones químicas). El calcio tiene veinte electrones, de modo que tiene dos electrones fuera

oxígeno en cada molécula de carbonato cálcico pueden tomar los seis electrones cedidos por un átomo de calcio y un átomo de carbono; existen los electrones precisos para cerrar el círculo. Es la fuerza eléctrica originada por esta transferencia de electrones la que mantiene unida la molécula. ¿Qué pasa con los pesos atómicos? Sabemos desde el trabajo de Rutherford en 1911 que la casi totalidad de la masa o el peso del átomo está contenida en un núcleo pequeño positivamente cargado en torno al cual giran los electrones. Después de alguna confusión, finalmente fue reconocido en los años treinta que los núcleos atómicos constan de dos tipos de partículas con una masa aproximadamente igual: los protones, con una carga eléctrica positiva igual en magnitud a la carga negativa del electrón, y los neutrones, que no tienen carga. El núcleo de hidrógeno consiste en un solo protón. El número de protones debe igualar al número de electrones para mantener al átomo eléctricamente neutro<sup>13</sup>, y los neutrones son necesarios porque la atracción fuerte entre protones y neutrones es esencial para mantener unido al núcleo. Los neutrones y los protones tienen aproximadamente el mismo peso y los electrones pesan mucho menos, de modo que, con una muy buena aproximación, el peso de un átomo es simplemente proporcional al número total de protones y neutrones en su núcleo: uno (un protón) para el hidrógeno, doce

---

de las capas completas del argón y los puede perder fácilmente. El oxígeno tiene ocho electrones, así que le faltan dos para completar las capas del neón y rápidamente acepta dos electrones para llenar los huecos en sus capas. El carbono tiene seis electrones, de modo que puede ser considerado bien como helio con cuatro electrones extras, bien como neón con cuatro electrones de menos, y por lo tanto puede perder o ganar cuatro electrones. (Esta ambivalencia permite que los átomos de carbono se ligen muy fuertemente entre sí, como en un diamante).

<sup>13</sup> Si el átomo lleva una carga eléctrica positiva o negativa, entonces tiende a aceptar o ceder electrones hasta que se hace eléctricamente neutro.

para el carbono, dieciséis para el oxígeno y cuarenta para el calcio, correspondientes a los pesos atómicos conocidos, pero no entendidos, en la época de Huxley.

*¿Por qué?* ¿Por qué hay un neutrón y un protón, uno neutro y el otro cargado, ambos con la misma masa aproximadamente y mucho más pesados que el electrón? ¿Por qué se atraen mutuamente con una fuerza tan intensa que forman núcleos atómicos unas cien mil veces más pequeños que los propios átomos? De nuevo encontramos la explicación en los detalles de nuestro actual modelo estándar de las partículas elementales. Los quarks más ligeros son los llamados *u* y *d* (de *up*, arriba, y *down*, abajo) y tienen cargas  $+2/3$  y  $1/3$  respectivamente (en unidades tales que la carga del electrón vale  $-1$ ); los protones constan de dos quarks *u* y un quark *d*, y por consiguiente su carga es  $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$ ; los neutrones constan de un quark *u* y dos quarks *d*, y por consiguiente tienen carga  $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$ . Las masas del protón y del neutrón son casi iguales porque tales masas se deben esencialmente a las fuerzas fuertes que mantienen ligados a los quarks, y estas fuerzas son las mismas para los quarks *u* y *d*. El electrón es mucho más ligero porque no siente estas fuerzas fuertes. Todos estos quarks y electrones son gránulos de la energía de diversos campos y sus propiedades se siguen de las propiedades de dichos campos.

Así pues, hemos aquí de nuevo en el modelo estándar. De hecho, *cualquier* pregunta sobre las propiedades físicas y químicas del carbonato cálcico nos lleva de la misma forma a través de una

cadena de «por qué» hasta el mismo punto de convergencia: hasta nuestra actual teoría mecanocuántica de las partículas elementales, el modelo estándar. Pero la física y la química son fáciles. ¿Qué pasa con algo más arduo como la biología?

Nuestro trozo de tiza no es un cristal perfecto de carbonato cálcico, pero tampoco es un amasijo desordenado de moléculas individuales como lo es un gas. Más bien, como Huxley explicaba en su charla en Norwich, la tiza está compuesta de esqueletos de animales minúsculos que absorbieron sales de calcio y dióxido de carbono de los mares antiguos y utilizaron estos compuestos químicos como materias primas para construir pequeñas conchas de carbonato cálcico alrededor de sus cuerpos blandos. No se necesita mucha imaginación para ver que esto les resultaba ventajoso: el mar no es un lugar seguro para un montón de proteínas desprotegidas. Pero esto no explica por sí mismo por qué las plantas y animales desarrollan órganos como las conchas de carbonato cálcico que les ayudan a sobrevivir; necesitar algo no significa obtenerlo. La clave la proporcionó la obra de Darwin y Wallace que Huxley hizo tanto por popularizar y defender. Los organismos vivos muestran variaciones heredadas, algunas útiles y otras no, y son los organismos portadores de variaciones útiles los que tienden a sobrevivir y transmitir estas características a su descendencia. Pero ¿por qué existen variaciones y por qué son hereditarias? Esto fue finalmente explicado en los años cincuenta en términos de la estructura de una molécula muy grande, el ADN, que sirve como un refugio para que se ensamblen las proteínas a partir de aminoácidos. La molécula de



ADN forma una doble hélice que almacena información genética en un código basado en la secuencia de las unidades químicas a lo largo de las dos ramas de la hélice. La información genética se transmite cuando la doble hélice se escinde y cada una de sus dos ramas se ensambla con una copia de sí misma; las variaciones hereditarias se producen cuando algún accidente perturba las unidades químicas que constituyen las ramas de la hélice.

Una vez que descendemos al nivel de la química, el resto es relativamente fácil. Ciertamente, el ADN es demasiado complicado para permitirnos utilizar las ecuaciones de la mecánica cuántica para establecer su estructura. Pero se tiene un conocimiento bastante bueno de la estructura a partir de las reglas ordinarias de la química y nadie tiene duda de que, con un ordenador suficientemente grande, podríamos explicar en principio todas las propiedades del ADN resolviendo las ecuaciones de la mecánica cuántica para los electrones y los núcleos de unos pocos elementos comunes cuyas propiedades son, a su vez, explicadas por el modelo estándar. Así, nos encontramos de nuevo en el mismo punto de convergencia de nuestras flechas explicativas.

He omitido una diferencia importante entre la biología y las ciencias físicas: el elemento histórico. Si por «tiza» entendemos «el material de los acantilados blancos de Dover» o «lo que Huxley tenía en la mano», entonces el enunciado de que la tiza es un 40 por 100 de calcio, un 12 por 100 de carbono y un 48 por 100 de oxígeno debe encontrar su explicación en una mezcla de lo universal y lo histórico, incluyendo los accidentes que tuvieron lugar en la historia

de nuestro planeta o en la vida de Thomas Huxley. Las proposiciones que esperamos explicar en términos de leyes finales de la naturaleza son aquellas que tratan de universales. Uno de estos universales es el enunciado de que (a temperaturas y presiones suficientemente bajas) existe un compuesto químico formado precisamente por calcio, carbono y oxígeno en estas proporciones. Pensamos que tales enunciados son ciertos en cualquier lugar del universo y en cualquier instante. Análogamente, podemos establecer proposiciones universales sobre las propiedades del ADN, pero el hecho de que existan criaturas vivientes en la Tierra que utilizan el ADN para transmitir variaciones aleatorias de una generación a la siguiente depende de ciertos accidentes históricos: existe un planeta como la Tierra, la vida y la genética llegaron a empezar de alguna forma, y la evolución ha dispuesto de un largo periodo de tiempo para hacer su trabajo.

La biología no es la única ciencia que incluye este elemento histórico. Lo mismo es cierto para muchas otras ciencias, como la geología y la astronomía. Supongamos que tomamos nuestro trozo de tiza una vez más y preguntamos por qué existe suficiente calcio, carbono y oxígeno en la Tierra para proporcionar materias primas para las conchas fósiles que dieron lugar a la tiza. Esto es fácil: estos elementos son muy comunes en todo el universo. Pero ¿por qué es así? De nuevo debemos apelar a una mezcla de historia y de principios universales. Utilizando el modelo estándar de las partículas elementales sabemos cómo seguir el curso de las reacciones nucleares en la teoría estándar del *big bang* del universo

lo bastante bien para ser capaces de calcular que la materia formada en los primeros minutos del universo consistía en alrededor de tres cuartas partes de hidrógeno y una cuarta parte de helio, con sólo pequeños indicios de otros elementos, principalmente los muy ligeros como el litio. Ésta es la materia prima a partir de la cual los elementos más pesados se formaron más tarde en las estrellas. Cálculos del curso posterior de las reacciones nucleares en las estrellas muestran que los elementos que se producen con más abundancia son aquéllos cuyos núcleos están más rígidamente ligados, y estos elementos incluyen el carbono, el oxígeno y el calcio. Las estrellas arrojan este material al medio interestelar de diferentes formas, en vientos estelares y en explosiones de supernovas, y a partir de este medio, rico en los constituyentes de la tiza, se formaron las estrellas de segunda generación, como lo es el Sol con sus planetas. Pero este escenario aún depende de una hipótesis histórica: la hipótesis de que hubo un *big bang* más o menos homogéneo con aproximadamente diez mil millones de fotones por cada quark. Se han hecho intentos para explicar esta hipótesis en diversas teorías cosmológicas especulativas, pero estas teorías descansan a su vez en otras hipótesis históricas.

No es evidente que los elementos universales y los elementos históricos en nuestras ciencias vayan a permanecer separados para siempre. En la moderna mecánica cuántica, igual que en la mecánica newtoniana, existe una clara separación entre las condiciones que nos dan el estado inicial de un sistema (ya sea el universo entero o sólo una parte de él) y las leyes que gobiernan su

evolución posterior. Pero es posible que al final las condiciones iniciales aparezcan como parte de las leyes de la naturaleza. Un ejemplo sencillo de cómo esto es posible lo proporciona la llamada cosmología del estado estacionario, propuesta a finales de los años cuarenta por Hermann Bondi y Thomas Gold y (en una versión algo diferente) por Fred Hoyle. En esta imagen, aunque cada galaxia se está separando de las demás (un hecho a menudo expresado en el algo equívoco enunciado de que el universo se está expandiendo)<sup>14</sup>, los vacíos intergalácticos en expansión se llenan de nueva materia que se está creando continuamente al ritmo preciso para hacer que el universo tenga siempre la misma apariencia. No tenemos una teoría creíble de como pudiera tener lugar esta continua creación de materia, pero resulta plausible que, si tuviéramos una teoría tal, podríamos utilizarla para demostrar que la expansión del universo tiende a un ritmo de equilibrio en el que la creación compensaría exactamente la expansión, de la misma forma que se supone que los precios se ajustan hasta que la oferta iguala a la demanda. En tal teoría del estado estacionario no existen condiciones iniciales porque no existe comienzo, y en su lugar podemos deducir la apariencia del universo de la condición de que éste no cambia.

La versión original de la cosmología del estado estacionario ha quedado prácticamente descartada por diversas observaciones astronómicas, entre las que destaca el descubrimiento en 1964 de la radiación de microondas, que parece ser el residuo de una época en

---

<sup>14</sup> Es equívoco decir que el universo está en expansión, porque los sistemas solares y las galaxias no están en expansión, ni el propio espacio está en expansión. Las galaxias se están alejando en el mismo sentido en que cualquier nube de partículas acaba dispersándose una vez que éstas se ponen en movimiento separándose unas de otras.

que el universo era mucho más caliente y más denso. Es posible que la idea del estado estacionario pueda ser revivida en una escala mayor, en alguna teoría cosmológica futura en la que la actual expansión del universo aparezca como una simple fluctuación en un universo eterno, pero constantemente fluctuante que, en promedio, permanece siempre igual. Existen otras vías algo más sutiles mediante las que las condiciones iniciales podrían quizá ser deducidas algún día a partir de leyes finales. James Hartley y Stephen Hawking han propuesto una vía según la cual esta fusión de la física y la historia podría producirse en la aplicación de la mecánica cuántica al universo entero. La cosmología cuántica es ahora una materia de activa controversia entre los teóricos; los problemas conceptuales y matemáticos son muy difíciles, y no parece que estemos llegando a ninguna conclusión definitiva.

En cualquier caso, aun si las condiciones iniciales del universo pudieran finalmente ser integradas o deducidas de las leyes de la naturaleza, en la práctica nunca podríamos eliminar los elementos accidentales o históricos de ciencias como la biología, la astronomía o la geología. Stephen Jay Gould ha utilizado los fósiles desenterrados en los yacimientos de Burgess Shale en la Columbia Británica para ilustrar cuán poca inevitabilidad existe en las formas de evolución biológica en la Tierra<sup>xii</sup>. Incluso un sistema muy sencillo puede exhibir un fenómeno conocido como *caos* que desafía nuestros esfuerzos para predecir el futuro del sistema. Un sistema caótico es un sistema en el que condiciones iniciales casi idénticas pueden llevar, después de un cierto intervalo de tiempo, a

resultados completamente diferentes. La posibilidad de caos en sistemas sencillos ha sido conocida de hecho desde comienzos de siglo; el matemático y físico Henri Poincaré demostró que el caos puede desarrollarse incluso en un sistema tan sencillo como un sistema solar con sólo dos planetas. Desde hace muchos años se han explicado las bandas oscuras en los anillos de Saturno como huecos correspondientes a aquellas posiciones precisas en los anillos en las que cualquier partícula que estuviese orbitando sería expulsada por su movimiento caótico. Lo que es nuevo y excitante en el estudio del caos no es el descubrimiento de que el caos existe, sino el de que ciertos tipos de caos exhiben propiedades casi universales que pueden ser analizadas matemáticamente.

La existencia de caos no significa que el comportamiento de un sistema como el de los anillos de Saturno no esté completamente determinado por las leyes del movimiento, de la gravitación y de sus condiciones iniciales, sino solamente que, como cuestión práctica, no podemos calcular cómo evolucionan algunas cosas (tales como las órbitas de las partículas en las bandas oscuras de los anillos de Saturno). Para decirlo de forma algo más precisa: la presencia de caos en un sistema significa que, cualquiera que sea la precisión con la que especifiquemos las condiciones iniciales, llegará finalmente un instante en el que habremos perdido toda la capacidad de predecir cómo se comportará el sistema, aunque sigue siendo cierto que, si queremos poder predecir el comportamiento de un sistema físico gobernado por las leyes de Newton en un futuro muy lejano, existe un grado dado de precisión con el que una

medida de las condiciones iniciales nos permitiría hacer dicha predicción. (Esto es lo mismo que decir que, aunque cualquier automóvil en marcha llegará finalmente a quedarse sin gasolina, por mucha que pongamos en el depósito, para cualquier distancia que queramos recorrer, por grande que sea, siempre habrá alguna cantidad de gasolina que nos lleve hasta allí). En otras palabras, el descubrimiento del caos no anula el determinismo de la física precuántica, pero nos obliga a ser un poco más cuidadosos al decir lo que entendemos por dicho determinismo. La mecánica cuántica no es determinista en el mismo sentido en que lo es la mecánica newtoniana; el principio de incertidumbre de Heisenberg nos advierte que no podemos medir exactamente la posición y la velocidad de una partícula en el mismo instante, y que, incluso si hiciéramos todas las medidas posibles en un instante, sólo podríamos predecir probabilidades sobre los resultados de experimentos en cualquier instante posterior. Sin embargo, vamos a ver que incluso en mecánica cuántica sigue existiendo un sentido en el que el comportamiento de cualquier sistema físico está completamente determinado por sus condiciones iniciales y las leyes de la naturaleza.

Por supuesto, cualquier forma de determinismo que sobreviva en principio no nos sirve de mucha ayuda cuando tenemos que tratar sistemas reales que no son sencillos, como el mercado de valores o la vida en la Tierra. La intrusión de accidentes históricos establece límites permanentes a lo que podemos tener esperanzas de explicar alguna vez. Cualquier explicación de las actuales formas de vida

sobre la Tierra debe tener en cuenta la extinción de los dinosaurios hace 65 millones de años, que actualmente es explicada por el impacto de un cometa, aunque nadie será nunca capaz de explicar por qué un cometa chocó con la Tierra precisamente en aquel momento. Lo más que podemos esperar para la ciencia es que seamos capaces de rastrear las explicaciones de todos los fenómenos naturales hasta leyes finales *y* accidentes históricos.

La intrusión de accidentes históricos en la ciencia significa también que tenemos que ser muy cuidadosos con el tipo de explicaciones que pedimos a nuestras leyes finales. Por ejemplo, cuando Newton propuso por primera vez sus leyes del movimiento y de la gravitación se manifestó la objeción de que estas leyes no explicaban una de las regularidades más sobresalientes del Sistema Solar, la de que todos los planetas giran en torno al Sol en el mismo sentido. Hoy sabemos que esto es una cuestión de historia. El modo en que los planetas giran en torno al Sol es una consecuencia del modo particular en que el Sistema Solar se condensó a partir de un disco de gas en rotación. No esperaríamos ser capaces de deducirlo sólo de las leyes del movimiento y de la gravitación. La separación de ley e historia es una tarea delicada que continuamente estamos aprendiendo a llevar a cabo a medida que avanzamos.

No solamente es posible que lo que ahora consideramos como condiciones iniciales arbitrarias puedan finalmente ser deducidas a partir de leyes universales; recíprocamente, también es posible que principios que *ahora* consideramos como leyes universales resulten representar finalmente accidentes históricos. Recientemente,



algunos físicos teóricos han estado jugando con la idea de que lo que normalmente llamamos el universo, la nube de galaxias en expansión que se extiende en todas direcciones hasta al menos diez mil millones de años luz, es simplemente un subuniverso, una pequeña parte de un megauniverso mucho mayor que consta de muchas de tales partes, en cada una de las cuales lo que llamamos constantes de la naturaleza (la carga eléctrica del electrón, los cocientes de las masas de las partículas elementales y demás) pueden tomar valores diferentes. Quizá incluso se llegue a descubrir que lo que ahora llamamos leyes de la naturaleza varían de un subuniverso a otro. En tal caso, la explicación de las constantes y las leyes que hemos descubierto podría incluir un elemento histórico irreducible: el accidente de que estamos en el subuniverso particular en que habitamos. Pero incluso si resultase haber algo de cierto en estas ideas, no creo que tengamos que abandonar nuestros sueños de descubrir leyes finales de la naturaleza: las leyes finales serían megaleyas que determinan las probabilidades de estar en diferentes tipos de subuniversos. Sidney Coleman y otros ya han dado pasos valerosos hacia el cálculo de estas probabilidades aplicando la mecánica cuántica al megauniverso entero. Insisto en que éstas son ideas muy especulativas, no completamente formuladas en forma matemática y, hasta el momento, sin apoyo experimental.

Hasta ahora he reconocido dos problemas en la idea de cadenas explicativas que nos llevan hasta leyes finales: la intrusión de accidentes históricos y la complejidad que nos impide ser capaces

en la práctica de explicar todo, incluso cuando sólo consideramos universales libres del elemento histórico. Tenemos ahora que afrontar otro problema, asociado con la palabra de moda «emergencia». A medida que examinamos la naturaleza a niveles de complejidad cada vez mayor, vemos fenómenos emergentes que no tienen correspondencia en los niveles más simples, y menos aún en el nivel de las partículas elementales. Por ejemplo, no hay nada similar a la inteligencia en el nivel de las células vivas individuales, y nada similar a la vida en el nivel de los átomos y las moléculas. La idea de emergencia fue muy bien captada por el físico Philip Anderson en el título de un artículo de 1972: «Más es diferente<sup>xiii</sup>». La emergencia de nuevos fenómenos en altos niveles de complejidad es más obvia en la biología y las ciencias sociales, pero es importante reconocer que tal emergencia no representa algo especial de la vida o de los asuntos humanos: también ocurre dentro de la propia física.

El ejemplo de emergencia que ha sido más importante históricamente en la física es la termodinámica, la ciencia del calor. Tal como fue originalmente formulada en el siglo XIX por Carnot, Clausius y otros, la termodinámica era una ciencia autónoma, no deducida de la mecánica de partículas y fuerzas sino basada en conceptos como los de entropía y temperatura que no tienen equivalentes en la mecánica. Sólo la Primera Ley de la Termodinámica, la ley de conservación de la energía, proporciona un puente entre la mecánica y la termodinámica. El principio central de la termodinámica era la Segunda Ley, según la cual (en

una de sus posibles formulaciones) los sistemas físicos no poseen solamente una energía y una temperatura sino también una cierta cantidad llamada entropía<sup>15</sup>, que siempre crece con el tiempo en todo sistema cerrado y alcanza un máximo cuando el sistema está en equilibrio<sup>16</sup>. Éste es el principio que prohíbe que el océano Pacífico transfiera espontáneamente tanta energía calorífica al océano Atlántico que el Pacífico llegue a congelarse y el Atlántico hierva; semejante cataclismo no necesita violar la conservación de la energía, pero está físicamente prohibido porque haría disminuir la entropía.

Los físicos del siglo XIX generalmente tomaban la Segunda Ley de la Termodinámica como un axioma derivado de la experiencia, tan fundamental como cualquier otra ley de la naturaleza. En aquella época esto no era irrazonable. La termodinámica se veía funcionar en contextos muy diferentes, desde el comportamiento del vapor (el problema que dio origen a la termodinámica) hasta la congelación, la ebullición y las reacciones químicas. (Hoy día añadiríamos ejemplos más exóticos; los astrónomos han descubierto que las nubes de estrellas en los cúmulos globulares en nuestra propia o en otras galaxias se comportan como gases con temperaturas definidas, y el trabajo de Jacob Bekenstein y Hawking ha demostrado teóricamente que un agujero negro tiene una entropía

---

<sup>15</sup> Para definir la entropía imaginemos que la temperatura de cierto sistema se aumenta muy lentamente a partir del cero absoluto. El incremento en la entropía del sistema, a medida que recibe pequeñas cantidades nuevas de energía calorífica, es igual a dicha energía dividida por la temperatura absoluta a la que se ha suministrado el calor.

<sup>16</sup> Es importante notar que la entropía puede decrecer en un sistema que puede intercambiar energía con su entorno. La emergencia de la vida en la Tierra representa un decrecimiento de entropía que está permitido por la termodinámica debido a que la Tierra recibe energía del Sol y pierde energía hacia el espacio exterior.

proporcional al área de su superficie). Si la termodinámica es universal, ¿cómo puede estar lógicamente relacionada con la física de tipos concretos de partículas y fuerzas?

Más adelante, en la segunda mitad del siglo XIX, el trabajo de una nueva generación de físicos teóricos (incluyendo a Maxwell en Escocia, Ludwig Boltzmann en Alemania<sup>17</sup> y Josiah Willard Gibbs en Norteamérica) demostró que los principios de la termodinámica podían ser deducidos matemáticamente mediante un análisis de las propiedades de las diferentes configuraciones de ciertos tipos de sistemas, aquellos sistemas cuya energía se reparte entre un número muy grande de subsistemas, como es el caso de un gas cuya energía se reparte entre las moléculas de las que está compuesto. (Ernest Nagel daba esto como un ejemplo paradigmático de la reducción de una teoría a otra<sup>xiv</sup>). En esta mecánica estadística, la energía térmica de un gas es precisamente la energía cinética de sus partículas; la entropía es una medida del desorden del sistema; y la segunda ley de la termodinámica expresa la tendencia de los sistemas aislados a hacerse más desordenados. El flujo de todo el calor de los océanos hacia el océano Atlántico supondría un incremento de orden, y ésta es la razón de que no ocurra.

Durante un cierto periodo de tiempo, en los años ochenta y noventa del siglo pasado, se libró una batalla entre los defensores de la nueva mecánica estadística y aquéllos, como Planck y el químico Wilhelm Ostwald, que seguían manteniendo la independencia lógica

---

<sup>17</sup> En realidad, el trabajo de Boltzmann se desarrolló principalmente en Austria. (*N. del t.*)

de la termodinámica<sup>xv</sup>. Ernst Zermelo fue incluso más lejos y argumentó que, puesto que sobre las bases de la mecánica estadística la disminución de la entropía sería muy poco probable pero no imposible, las hipótesis sobre las moléculas en que se basa la mecánica estadística deben ser falsas. Esta batalla fue ganada por la mecánica estadística después de que la realidad de los átomos y las moléculas fuera aceptada generalmente a comienzos de este siglo. Sin embargo, aunque la termodinámica ha sido explicada en términos de partículas y fuerzas, continúa tratando con conceptos emergentes como los de temperatura y entropía, que pierden todo significado en el nivel de las partículas individuales.

La termodinámica es más un modo de razonar que un cuerpo de leyes físicas universales; donde quiera que se aplica siempre nos permite justificar el uso de los mismos principios, pero la explicación del porqué la termodinámica se aplica a cualquier sistema particular toma la forma de una deducción según los métodos de la mecánica estadística a partir de los detalles de lo que contiene el sistema, y esto inevitablemente nos hace descender al nivel de las partículas elementales<sup>18</sup>. En términos de la imagen de flechas explicativas que invoqué antes, podemos considerar la termodinámica como una cierta estructura de flechas que aparece una y otra vez en contextos físicos muy diferentes, pero, donde quiera que esta estructura de explicación aparezca, las flechas

---

<sup>18</sup> La termodinámica se aplica a los agujeros negros no porque ellos contengan un gran número de átomos, sino porque contienen un gran número de unidades de la masa fundamental de la teoría cuántica de la gravitación, aproximadamente igual a una cienmilésima de gramo y conocida como masa de Planck. No sería posible aplicar la termodinámica a un agujero negro que pesara menos de una cienmilésima de gramo.

pueden ser rastreadas según los métodos de la mecánica estadística hasta leyes más profundas y, finalmente, hasta los principios de la física de partículas elementales. Como muestra este ejemplo, el hecho de que una teoría científica encuentre aplicaciones en una amplia variedad de fenómenos diferentes no implica nada sobre la autonomía de esta teoría respecto a leyes físicas más profundas.

La misma máxima se aplica a otras áreas de la física como son los temas afines del caos y la turbulencia. Los físicos que trabajan en estas áreas han encontrado ciertas pautas de comportamiento que se dan una y otra vez en contextos muy diferentes; por ejemplo, se piensa que existe cierto tipo de universalidad en la distribución de energía entre remolinos de tamaño diverso en todo tipo de fluidos turbulentos, desde la turbulencia del flujo de marea en Puget Sound hasta la turbulencia en el gas interestelar que produce el paso de una estrella. Pero no todos los flujos de fluidos son turbulentos y, cuando ocurre, la turbulencia no siempre exhibe estas propiedades «universales». Cualquiera que sea el razonamiento matemático que dé cuenta de las propiedades universales de la turbulencia, aún tenemos que explicar *por qué* este razonamiento sería aplicable a cualquier fluido turbulento concreto, y esta pregunta inevitablemente será respondida en términos de accidentes (la velocidad del flujo de marea y la forma del canal) y universales (las leyes del movimiento del fluido y las propiedades del agua) que, a su vez, deben ser explicados en términos de leyes más profundas.

Comentarios similares son aplicables a la biología. Aquí, la mayor parte de lo que vemos depende de accidentes históricos, pero

existen algunas pautas aproximadamente universales, como la regla de la biología de poblaciones que dicta que los machos y las hembras tienden a nacer en números iguales. (En 1930 el genetista Ronald Fisher explicó que, una vez que una especie desarrolla una tendencia a producir, pongamos por caso, más machos que hembras, cualquier gen que dé a los individuos una tendencia a producir más hembras que machos se extenderá por toda la población, puesto que la descendencia femenina de los individuos que portan este gen hallará menos competencia para encontrar un macho). Reglas como ésta se aplican a una amplia variedad de especies y podría esperarse que se apliquen incluso a la vida descubierta en otros planetas si fuese de reproducción sexual. El razonamiento que conduce a estas reglas es el mismo ya se aplique a seres humanos o a aves o a extraterrestres, pero el razonamiento descansa siempre sobre ciertas hipótesis acerca de los organismos involucrados y, si preguntamos *por qué* estas hipótesis deberían ser correctas, debemos buscar parte de la respuesta en términos de accidentes históricos y parte en términos de universales como las propiedades del ADN (o cualquier cosa que ocupe su lugar en otros planetas) que, a su vez, deben encontrar su explicación en la física y en la química y, por consiguiente, en el modelo estándar de las partículas elementales.

Este punto tiende a quedar oscurecido porque en el trabajo real de la termodinámica, la dinámica de fluidos o la biología de poblaciones, los científicos utilizan lenguajes que son específicos de sus propios campos, hablando de entropía o de remolinos o de

estrategias reproductivas, y no el lenguaje de las partículas elementales. Esto no se debe sólo a que seamos incapaces en la práctica de utilizar nuestros primeros principios para calcular complicados fenómenos; también es un reflejo del tipo de preguntas que queremos plantear a propósito de estos fenómenos. Incluso si dispusiésemos de un enorme ordenador que pudiera seguir la historia de cualquier partícula elemental en un flujo de marea o en una mosca de la fruta, esta montaña de resultados del ordenador no sería de mucha utilidad para alguien que quisiera saber si el agua era turbulenta o si la mosca estaba viva.

No hay razón para suponer que la convergencia de explicaciones científicas deba llevar a una convergencia de métodos científicos. La termodinámica, y el caos y la biología de poblaciones continuarán operando cada uno de ellos con su propio lenguaje y bajo sus propias reglas, cualquiera que sea lo que aprendamos acerca de las partículas elementales. Como dice el químico Roald Hoffman, «muchos de los conceptos útiles de la química... son imprecisos. Cuando se les reduce a la física tienden a desaparecer<sup>xvi</sup>». En un ataque a aquellos que tratan de reducir la química a la física, Hans Primas enumeraba algunos de los conceptos útiles de la química que estaban en peligro de perderse en esta reducción: valencia, estructura de enlace, orbitales localizados, aromaticidad, acidez, color, olor y repelencia al agua<sup>xvii</sup>. Yo no veo la razón para que los químicos tuvieran que dejar de hablar de tales cosas mientras las encuentren útiles o interesantes. Pero el que continúen haciéndolo no deja dudas sobre el hecho de que todas estas nociones de la



química funcionan como lo hacen debido a la mecánica cuántica subyacente de los electrones, protones y neutrones. Como lo expone Linus Pauling: «No hay ninguna parte de la química que no dependa, en su teoría fundamental, de los principios cuánticos<sup>xviii</sup>».

De todas las áreas de la experiencia que tratamos de ligar a los principios fundamentales de la física mediante flechas explicativas, la consciencia es la que nos plantea mayores dificultades. Tenemos experiencia directa de nuestros propios pensamientos conscientes, sin intervención de los sentidos, de modo que ¿cómo podría la consciencia ser llevada al ámbito de la física y de la química? El físico Brian Pippard, quien ocupó la antigua cátedra de Maxwell como *Cavendish Professor* en la Universidad de Cambridge, lo ha expuesto de este modo: «Lo que seguramente es imposible es que un físico teórico, supuesta una potencia de cálculo ilimitada, pueda deducir de las leyes de la física que una cierta estructura compleja sea consciente de su propia existencia<sup>xix</sup>».

Tengo que confesar que encuentro esta cuestión terriblemente difícil, y yo no soy especialmente experto en tales materias. Pero creo que estoy en desacuerdo con Pippard y muchos otros que adoptan la misma posición. Es evidente que existe lo que un crítico literario podría denominar un correlato objetivo de la consciencia; existen cambios físicos y químicos en mi cuerpo y en mi cerebro que observo que están correlacionados (como causa o como efecto) con cambios en mis pensamientos conscientes. Tiendo a sonreír cuando estoy a gusto; mi cerebro muestra una actividad eléctrica diferente cuando estoy despierto que cuando estoy dormido; poderosas

emociones son desencadenadas por las hormonas en mi sangre; y a veces expreso verbalmente mis pensamientos. Todo esto no es la propia consciencia: nunca puedo expresar en términos de sonrisas o de ondas cerebrales o de hormonas o de palabras lo que es *sentirse* feliz o triste. Pero dejando a un lado la consciencia por un momento, parece razonable suponer que estos correlatos objetivos de la consciencia pueden ser estudiados con los métodos de la ciencia y finalmente podrán ser explicados en términos de la física y la química del cuerpo y del cerebro. (Por «explicados» no entiendo necesariamente que seremos capaces de predecir todo, y ni siquiera mucho, sino que entenderemos por qué las sonrisas, las ondas cerebrales y las hormonas funcionan como lo hacen, de la misma forma que, aunque no podamos predecir el clima del mes próximo, ya comprendemos por qué el clima funciona como lo hace).

En la misma Cambridge de Pippard hay un grupo de biólogos encabezados por Sydney Brenner que han establecido completamente el diagrama de conexiones del sistema nervioso de un pequeño gusano nemátodo, *C. elegans*, de tal modo que ellos ya tienen una base para comprender en cierto sentido por qué ese gusano se comporta como lo hace. (Lo que por el momento falta es un programa basado en este diagrama de conexiones que pueda generar el comportamiento observado en el gusano). Por supuesto, un gusano no es un ser humano. Pero entre un gusano y un ser humano existe un continuo de animales con sistemas nerviosos de complejidad creciente, que abarcan los insectos, los peces, y los

simios y los monos. ¿Dónde hay que trazar la línea divisoria<sup>19</sup>?

Supongamos entonces que llegamos a comprender los correlatos objetivos de la consciencia en términos de la física (incluyendo la química) y que también llegamos a comprender cómo evolucionaron hasta ser lo que son. No es irrazonable esperar que, cuando los correlatos objetivos de la consciencia hayan sido explicados, en alguna parte de nuestras explicaciones seamos capaces de reconocer algo, algún sistema físico de procesamiento de información, que corresponda a nuestra experiencia de la propia consciencia, a lo que Gilbert Ryle ha llamado «el espíritu en la máquina<sup>xx</sup>». Puede que esto no sea una explicación de la consciencia, pero estará bastante próximo a ella.

No hay garantía de que el progreso en otros campos de la ciencia sea asistido directamente por algo nuevo que se descubra acerca de las partículas elementales. Pero (repito, y no por última vez) estoy interesado aquí no tanto en lo que los científicos *hacen*, porque esto inevitablemente refleja las limitaciones y los intereses humanos, sino en el orden lógico intrínseco de la propia naturaleza. En este sentido es en el que podemos decir que ramas de la física como la termodinámica, y otras ciencias como la química y la biología, descansan en leyes más profundas y, en particular, en las leyes de la física de las partículas elementales.

Al hablar aquí de un orden lógico de la naturaleza he estado

---

<sup>19</sup> A veces se argumenta que el lenguaje es lo que constituye la diferencia entre el hombre y los otros animales, y que los seres humanos sólo se hacen conscientes cuando comienzan a hablar. Sin embargo, los ordenadores utilizan un lenguaje y no parecen ser conscientes, mientras que nuestro viejo gato siamés Tai Tai nunca habló (y tenía un número limitado de expresiones faciales) y, pese a ello, en todo lo demás mostraba los mismos signos de consciencia que los seres humanos.

adoptando tácitamente lo que un historiador de la filosofía llamaría una posición «realista»; realista no en el sentido moderno cotidiano de ser práctico y no hacerse ilusiones, sino en un sentido mucho más antiguo de creencia en la realidad de las ideas abstractas. Un realista medieval creía en la realidad de los universales como las formas de Platón, en oposición a los nominalistas como Guillermo de Ockham que las consideraban simples nombres. (Mi uso de la palabra «realista» habría complacido a uno de mis autores favoritos, el Victoriano George Gissing, que deseaba que «las palabras *realismo* y *realista* nunca volvieran a utilizarse, salvo que lo fueran en su sentido estricto por los escritores de filosofía escolástica<sup>xxi</sup>»). Ciertamente no quiero entrar en este debate del lado de Platón. Mi argumento aquí es a favor de la realidad de las leyes de la naturaleza, en oposición a los positivistas modernos que aceptan sólo la realidad de lo que puede ser directamente observado.

Cuando decimos que una cosa es real simplemente estamos expresando una especie de respeto. Queremos decir que la cosa debe ser tomada en serio porque puede afectarnos de maneras que no están enteramente bajo nuestro control, y porque no podemos aprender nada sobre ella sin hacer un esfuerzo que va más allá de nuestra propia imaginación. Esto es mucho más cierto, por ejemplo, para el caso de la silla en la que me siento (por poner un ejemplo favorito de los filósofos), y no constituye tanto una evidencia de que la silla es real, sino que más bien eso es precisamente lo que *entendemos* cuando decimos que la silla es real. En tanto que físico, percibo las explicaciones y las leyes científicas como cosas que son

lo que son y no pueden ser construidas sobre la marcha, de modo que mi relación con estas leyes no es tan diferente de mi relación con mi silla y, por consiguiente, concedo a las leyes de la naturaleza (a las que nuestras leyes actuales son una aproximación) el honor de ser reales. Esta impresión queda reforzada cuando se da el caso de que alguna ley de la naturaleza no es lo que pensábamos que era, una experiencia similar a descubrir que una silla no está en su lugar cuando uno acaba sentado en el suelo. Pero tengo que admitir que mi disposición a otorgar el título de «real» es algo similar a la disposición de Lloyd George a otorgar títulos de nobleza: es una medida de la pequeña diferencia que yo creo que suponen los títulos.

Esta discusión de la realidad de las leyes de la naturaleza podría hacerse menos académica si entrásemos en contacto con otros seres inteligentes en planetas lejanos que también hubiesen desarrollado explicaciones científicas para los fenómenos naturales. ¿Encontraríamos que ellos habían descubierto las mismas leyes de la naturaleza? Cualesquiera que fueran las leyes descubiertas por los extraterrestres estarían naturalmente expresadas en un lenguaje y una notación diferente, pero aún podríamos preguntar si existe algún tipo de correspondencia entre sus leyes y las nuestras. Si así fuera, sería difícil negar la realidad objetiva de dichas leyes.

Por supuesto, yo no sé cuál pueda ser la respuesta, pero aquí en la Tierra hemos visto ya un test a pequeña escala de una cuestión similar. Lo que llamamos la ciencia física moderna comenzó en Europa a finales del siglo XVI. Aquellos que dudan de la realidad de

las leyes de la naturaleza podrían haber conjeturado que, del mismo modo que otras partes del mundo han conservado sus propios lenguajes y religiones, así también deberían haber conservado sus propias tradiciones científicas, desarrollando finalmente leyes de la ciencia física completamente diferentes de las desarrolladas en Europa. Por supuesto, esto no sucedió: la física en el Japón moderno o en la moderna India es la misma que en Europa y en Norteamérica. Admito que este argumento no es totalmente convincente ya que el mundo entero ha sido profundamente influido por otros aspectos de la civilización occidental, desde las organizaciones militares hasta los pantalones vaqueros. De todas formas, la experiencia de asistir a una discusión sobre la teoría cuántica de campos o las interacciones débiles en una sala de seminarios en Tsukuba o Bombay me da una fuerte sensación de que las leyes de la física tienen su propia existencia.

Nuestro descubrimiento de la conexas y convergente estructura de la explicación científica tiene profundas implicaciones, y no sólo para los científicos. Al margen de la corriente principal del conocimiento científico existen pequeños estanques aislados que corresponden a lo que (para emplear un término neutro) podría llamar pseudociencias: astrología, precognición, «canalización», clarividencia, telequinesia, creacionismo, y sus afines. Si pudiera demostrarse que existe alguna verdad en alguna de estas nociones, ello constituiría el descubrimiento del siglo, mucho más excitante e importante que cualquier cosa que sucede hoy en el trabajo normal de la física. Así que ¿qué debería concluir un ciudadano consciente

cuando se afirma por un profesor o una estrella de cine o en los libros de Time-Life que existe evidencia de la validez de una de las pseudociencias?

En este punto, la respuesta convencional sería que esta evidencia debe ser contrastada con una mente abierta y sin prejuicios teóricos. Yo no creo que ésta sea una respuesta útil, pero dicha opinión parece estar muy extendida. Una vez, en una entrevista en televisión, dije que al creer en la astrología uno estaría volviendo la espalda a toda la ciencia moderna<sup>xxii</sup>. Entonces recibí una carta muy cortés de un antiguo químico y metalúrgico de Nueva Jersey que me regañaba porque yo no había estudiado personalmente la evidencia sobre la astrología. Análogamente, cuando Philip Anderson escribió recientemente en forma despectiva sobre la creencia en la clarividencia y telequinesia<sup>xxiii</sup>, fue censurado por un colega de Princeton, Robert Jahn, que estaba experimentando con lo que llama «fenómenos anómalos relacionados con la consciencia<sup>20</sup>». Jahn se quejaba de que «aunque su despacho [el de Anderson] está sólo a unos pocos cientos de metros del mío, él no ha visitado nuestro laboratorio, no ha discutido conmigo directamente ninguno de estos temas y aparentemente ni siquiera ha leído con cuidado nada de nuestra literatura técnica<sup>xxiv</sup>».

Lo que les falta a Jahn y al químico de Nueva Jersey y a otros que están de acuerdo con ellos es el sentido de la conexión del

---

<sup>20</sup> R. G. Jahn y B. J. Dunne, *Foundations of Physics*, 16 (1986), p. 721. Para ser honesto, debería añadir que Jahn ve su obra como una extensión razonable de la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, más que como parte de un programa paranormal. La interpretación realista «de las muchas historias» de la mecánica cuántica tiene la ventaja de que nos ayuda a evitar este tipo de confusión.

conocimiento científico. Nosotros no lo comprendemos todo, pero comprendemos bastante para saber que no hay lugar en este mundo para la telequinesia o la astrología. ¿Qué posible señal física de nuestros cerebros podría mover objetos lejanos y aun así no tener ningún efecto en los instrumentos científicos? Los defensores de la astrología señalan a veces los indudables efectos de la Luna y el Sol como causa de las mareas, pero los efectos de los campos gravitatorios de otros planetas son demasiado pequeños para tener efectos detectables en los océanos de la Tierra, y mucho menos en algo tan pequeño como una persona<sup>21</sup>. (No me extenderé en este punto, pero comentarios similares son aplicables a cualquier esfuerzo para explicar la clarividencia, la precognición o las otras pseudociencias en términos de la ciencia estándar). En cualquier caso, las correlaciones predichas por los astrólogos no son del tipo que pudieran surgir de algún efecto gravitatorio muy sutil; ¡los astrólogos no afirman simplemente que cierta configuración de planetas afecta a la vida en la Tierra, sino que estos efectos difieren para cada persona según la fecha y hora de su nacimiento! De hecho, no creo que la mayoría de la gente que cree en la astrología imagine que funciona como lo hace a causa de la gravitación o de cualquier otro agente dentro del marco de la física; pienso que ellos creen que la astrología es una ciencia autónoma, con sus propias leyes fundamentales, y que no se explica en términos de física o de

---

<sup>21</sup> La teoría de la relatividad general descansa en buena parte en el principio de que los campos gravitatorios *no* tienen efectos en un cuerpo muy pequeño en caída libre, excepto para determinar su movimiento de caída. La Tierra está en caída libre en el Sistema Solar, así que en la Tierra no sentimos el campo gravitatorio de la Luna o del Sol o cualquier otro, excepto en efectos como las mareas que aparecen debido a que la Tierra no es muy pequeña.



cualquier otra cosa. Uno de los mayores servicios que proporcionó el descubrimiento de la estructura de la explicación científica es el demostrarnos que no existen tales ciencias autónomas.

Pero, a pesar de todo, ¿no deberíamos poner a prueba la astrología y la telequinesia y todo lo demás para estar seguros de que no hay nada en ellas? No tengo nada en contra de alguien que ponga a prueba lo que le dé la gana, pero quiero explicar por qué yo no me molesto en hacerlo y por qué no recomendaría a nadie que lo hiciera. A cada instante a uno se le presenta una gran variedad de ideas innovadoras que podrían ser seguidas: no sólo la astrología y similares, sino muchas ideas mucho más cercanas a la corriente principal de la ciencia y otras que están totalmente dentro del ámbito de la moderna investigación científica. No basta con decir que *todas* estas ideas deben ser completamente verificadas: sencillamente no hay tiempo. Cada semana recibo por correo alrededor de cincuenta borradores de artículos sobre física de partículas elementales y astrofísica, junto con algunos artículos y cartas sobre todo tipo de pseudociencias. Incluso si abandonase cualquier otra cosa en mi vida no podría siquiera prestar a todas estas ideas una atención adecuada. Entonces, ¿qué tengo que hacer? No sólo los científicos, sino cualquier persona, se enfrentan a un problema similar. Para todos nosotros sencillamente no existe otra alternativa que hacer un juicio lo mejor que podamos sobre cuáles de estas ideas (quizá la mayoría de ellas) no merecen seguirse. Y nuestra mayor ayuda para hacer este juicio es nuestra comprensión de la estructura de la explicación científica.

Cuando los conquistadores españoles en México empezaron en el siglo XVI a avanzar hacia el norte, hacia el país ahora conocido como Texas, iban guiados por los rumores de ciudades de oro, las siete ciudades de Cibola. En aquel tiempo esto no resultaba tan irrazonable. Pocos europeos habían estado en Texas y todos sabían que podría contener cualquier maravilla. Pero supongamos que hoy día alguien presenta evidencia de que existen siete ciudades de oro en algún lugar de la Texas moderna. ¿Recomendaría usted abiertamente que se organizase una expedición para explorar todos los rincones del estado entre el río Rojo y el río Grande en busca de estas ciudades? Yo pienso que usted consideraría que sabemos ya tanto sobre Texas, y tanto se ha explorado y colonizado en ella, que simplemente no valdría la pena buscar misteriosas ciudades de oro. De la misma forma, nuestro descubrimiento de las conexas y convergentes estructuras de las explicaciones científicas nos ha hecho el gran servicio de enseñarnos que no hay lugar en la naturaleza para la astrología, la telequinesis, el creacionismo u otras supersticiones.

## Capítulo 2

### Dos hurras por el reduccionismo

*Querido, tú y yo sabemos por qué  
el cielo de verano es azul  
y también sabemos por qué los  
pájaros  
cantan melodías en los árboles<sup>22</sup>.  
MEREDITH WILLSON, *You and I**

Si usted pregunta por qué las cosas son como son y si, cuando se le da una explicación en términos de algún principio científico, usted pregunta por qué dicho principio es verdadero y si, como un niño maleducado, sigue preguntando ¿por qué?, ¿por qué?, ¿por qué?, entonces, más tarde o más temprano, alguien le llamará reduccionista. Diferentes personas dan diferentes significados a esta palabra, pero supongo que una característica común de la idea que todo el mundo tiene del reduccionismo es un sentido de jerarquía, de que algunas verdades son menos fundamentales que otras a las que las anteriores pueden ser reducidas, como la química puede ser reducida a la física. El reduccionismo se ha convertido en un mal ejemplo en la política científica; el Consejo de la Ciencia de Canadá atacó recientemente al Comité Coordinador de los Servicios Agrícolas de Canadá por estar dominado por reduccionistas<sup>xxv</sup>. (Presumiblemente, el Consejo Científico entendía que el Comité

---

<sup>22</sup> [Darling, you and I know the reason why / The summer sky is blue, / And we know why birds in the trees / Sing melodies too].

Coordinador hace demasiado hincapié en la biología y la química de las plantas). Los físicos de partículas elementales son especialmente susceptibles de ser calificados de reduccionistas, y el desdén por el reduccionismo a menudo ha enturbiado las relaciones entre ellos y otros científicos.

Los que se oponen al reduccionismo ocupan un espectro ideológico muy amplio. En el extremo más razonable están quienes objetan las más ingenuas formas de reduccionismo. Yo comparto sus objeciones. Me considero un reduccionista, pero no pienso que los problemas de la física de partículas elementales sean los únicos problemas interesantes y profundos de la ciencia, ni siquiera de la física. No creo que los químicos tengan que dejar cualquier otra cosa que estén haciendo y dedicarse a resolver las ecuaciones de la mecánica cuántica para moléculas diversas. No creo que los biólogos tengan que dejar de pensar en plantas y animales completos y pensar sólo en las células y el ADN. Para mí, el reduccionismo no es una guía para programas de investigación, sino una actitud hacia la propia naturaleza. No es ni más ni menos que la percepción de que los principios científicos son los que son debido a principios científicos más profundos (y, en algunos casos, accidentes históricos) y que todos estos principios pueden ser rastreados hasta un sencillo y conexo conjunto de leyes<sup>23</sup>. En este

---

<sup>23</sup> En cierta ocasión en un artículo llamé a este punto de vista «reduccionismo objetivo»; véase S. Weinberg, «Newtonianism, Reductionism, and the Art of Congressional Testimony», *Nature*, 330 (1987), pp. 433-437. Dudo que la frase calase en los filósofos de la ciencia, pero ha sido recogida por al menos un bioquímico, Joseph Robinson, en una respuesta a un ataque al reduccionismo por parte del filósofo H. Kincaid. Véase J. D. Robinson, «Aims and Achievements of the Reductionist Approach in Biochemistry/Molecular Biology/Cell Biology: A Response to Kincaid», *Philosophy of Science*, 59 (1992), p. 465.

momento de la historia de la ciencia parece que la mejor manera de aproximarse a estas leyes es a través de la física de las partículas elementales, pero éste es un aspecto incidental del reduccionismo y puede cambiar.

En el otro extremo del espectro están los adversarios del reduccionismo que están horrorizados por lo que ellos sienten que es la frialdad de la ciencia moderna. En la medida en que ellos y su mundo pueden ser reducidos a una cuestión de partículas o campos y sus interacciones, ellos se sienten disminuidos por dicho conocimiento. El hombre del subsuelo de Dostoyevski imagina a un científico diciéndole: «la naturaleza no te consulta; le traen sin cuidado tus deseos o que te gusten o no sus leyes. Tú debes aceptarla como es...», y él responde: «buen Dios, qué interés puedo tener en las leyes de la naturaleza y de la aritmética si por una razón u otra no me gustan dichas leyes...<sup>xxvi</sup>». Y en su extremo más extravagante están aquellos obsesionados con la holística, aquéllos cuya reacción al reduccionismo toma la forma de una creencia en energías psíquicas, fuerzas vitales que no pueden describirse en términos de las leyes ordinarias de la naturaleza inanimada. No voy a tratar de responder a estas críticas con una animada charla sobre las bellezas de la ciencia moderna. La imagen del mundo reduccionista es fría e impersonal. Tiene que ser aceptada tal como es, no porque nos guste, sino porque así es como el mundo funciona.

En la parte media del espectro de los antirreduccionistas se sitúa un grupo menos desinteresado y mucho más importante. Son los

científicos que se enfadan cuando oyen decir que sus ramas de la ciencia descansan en las leyes más profundas de la física de partículas elementales.

Durante algunos años he estado discutiendo sobre el reduccionismo con un buen amigo, el biólogo evolucionista Ernst Mayr, quien entre otras cosas nos ha proporcionado nuestra mejor definición operativa de una especie biológica. La discusión comenzó cuando, en un artículo de 1985<sup>xxvii</sup>, arremetió contra una línea de un artículo de *Scientific American* (sobre otras cuestiones) que yo había escrito en 1974<sup>xxviii</sup>. En este artículo, yo había mencionado que en física esperamos encontrar una pocas leyes generales sencillas que nos permitan explicar por qué la naturaleza es como es y que, actualmente, lo más próximo que tenemos a una visión unificada de la naturaleza es una descripción de las partículas elementales y sus interacciones mutuas. Mayr calificó esto en su artículo como «un horrible ejemplo de la forma de pensar de los físicos» y me calificó de «reduccionista intransigente». Yo respondí en un artículo en *Nature* que no soy un reduccionista intransigente; yo soy un reduccionista transigente<sup>xxix</sup>.

A esto siguió una correspondencia frustrante en la que Mayr esbozó una clasificación de los diferentes tipos de reduccionismo e identificó mi versión particular de esta herejía<sup>xxx</sup>. Yo no entendía la clasificación; todas sus categorías me sonaban iguales y ninguna de ellas describía mis puntos de vista. A su vez, él no entendía (eso me pareció) la distinción que yo estaba haciendo entre el reduccionismo como una fórmula general para el progreso en la ciencia, que no es

mi punto de vista, y el reduccionismo como un enunciado sobre el orden de la naturaleza, que yo pienso que sencillamente es cierto<sup>24</sup>. Mayr y yo seguimos en buenas relaciones, pero ya hemos dejado de tratar de convertirnos mutuamente.

Más grave para la planificación de la investigación nacional ha sido la oposición al reduccionismo dentro de la propia física. Los alegatos reduccionistas de la física de partículas elementales están enojando profundamente a algunos físicos que trabajan en otros campos, como la física de materia condensada, y que se sienten en competencia por la financiación con los físicos de partículas elementales. Estas discusiones han alcanzado nuevos niveles de malestar con la propuesta de gastar miles de millones de dólares en un acelerador de partículas, el Supercolisionador Superconductor. En 1987 el director ejecutivo de la oficina de relaciones públicas de la Sociedad Norteamericana de Física comentaba que el Supercolisionador «es quizá la cuestión que más divide e incluso enfrenta a la comunidad física<sup>xxxi</sup>». Durante el periodo que formé parte de la Junta de Supervisores del proyecto del

---

<sup>24</sup> Por lo que puedo entender, Mayr distingue tres tipos de reduccionismo: *reduccionismo constitutivo* (o reduccionismo ontológico, o análisis), que es un método de estudiar objetos mediante el examen de sus constituyentes básicos; *reduccionismo de las teorías*, que es la explicación de una teoría global en términos de una teoría más comprensiva; y *reduccionismo explicativo*, que es el punto de vista según el cual «el mero conocimiento de sus componentes últimos será suficiente para explicar un sistema complejo». La razón principal por la que yo rechazo esta clasificación es que ninguna de estas categorías tiene mucho que ver con lo que yo trato de decir (aunque supongo que el reduccionismo de las teorías es el que más se acerca). Cada una de estas tres categorías está definida por lo que los científicos realmente hacen o han hecho o podrían hacer; yo estoy hablando de la propia naturaleza. Por ejemplo, incluso a pesar de que los físicos no pueden explicar realmente las propiedades de moléculas muy complejas como la del ADN en términos de la mecánica cuántica de electrones, núcleos y fuerzas eléctricas, e incluso a pesar de que la química sigue tratando tales problemas con su lenguaje y conceptos propios, no existen principios autónomos de la química que sean simplemente verdades independientes que no reposan en principios más profundos de la física.

Supercolisionador, yo y los demás miembros de la Junta tuvimos que hacer un buen trabajo de exposición pública de los fines del proyecto. Uno de los miembros de la Junta argumentaba que no deberíamos dar la impresión de que pensábamos que la física de partículas elementales es más fundamental que otros campos, porque eso sólo conducía a irritar a nuestros amigos en otras áreas de la física.

Si damos la impresión de creer que la física de partículas elementales es más fundamental que otras ramas de la física es porque así es. No sé cómo defender las cantidades que hay que gastar en física de partículas sin ser franco sobre este punto. Pero al decir que la física de partículas elementales es más fundamental no quiero decir que sea más profunda matemáticamente, o que sea más necesaria para el progreso en otros campos o alguna otra cosa similar sino sólo que está más próxima al punto de convergencia de todas nuestras flechas explicativas.

A la cabeza de los físicos descontentos con las pretensiones de la física de partículas figura Philip Anderson, de los Laboratorios Bell y Princeton, un físico teórico que ha proporcionado muchas de las ideas más penetrantes subyacentes a la moderna física de materia condensada (la física de los semiconductores y superconductores y similares). Anderson testificó contra el proyecto del Supercolisionador en la misma audiencia del Comité del Congreso en la que yo testifiqué en 1987. Él pensaba (y yo también) que la investigación en física de materia condensada está infr FINANCIADA por la National Science Foundation. Él pensaba (y yo también) que



muchos licenciados están seducidos por el atractivo de la física de partículas elementales cuando podrían hacer carreras más satisfactorias científicamente en física de materia condensada y otros campos afines. Pero Anderson llegó a decir que «... ellos [los resultados de la física de partículas] no son en ningún sentido más fundamentales que lo que Alan Turing hizo al fundar la ciencia de los ordenadores o lo que Francis Crick y James Watson hicieron al descubrir el secreto de la vida<sup>xxxii</sup>».

¿No son en ningún sentido más fundamentales? Éste es el punto esencial en el que Anderson y yo nos separamos. Dejaré de lado el trabajo de Turing y los comienzos de la ciencia de los ordenadores, que me parecen pertenecer más a las matemáticas o a la tecnología que al ámbito normal de la ciencia natural. La matemática misma no es nunca una explicación de algo: es sólo el medio que utilizamos para explicar un conjunto de hechos a partir de otro y el lenguaje en el que expresamos nuestras explicaciones. Pero la descripción que hace Anderson del descubrimiento de Crick y Watson de la estructura de doble hélice de la molécula del ADN (que proporciona el mecanismo mediante el que la información genética es preservada y transmitida) como el secreto de la vida proporciona argumentos para *mi* razonamiento. Esta descripción del descubrimiento del ADN parecerá a algunos biólogos tan erróneamente reduccionista como las afirmaciones de los físicos de partículas le parecen a Anderson. Por ejemplo, Harry Rubin escribió hace algunos años que «[la] revolución del ADN llevó a una generación de biólogos a creer que el secreto de la vida reside enteramente en la estructura y la función

del ADN. Esta creencia es errónea y el programa reduccionista debe ser complementado con un nuevo marco conceptual<sup>xxxiii</sup>». Mi amigo Ernst Mayr ha estado luchando durante años contra la tendencia reduccionista en biología que, teme él, se propone reducir todo lo que sabemos sobre la vida al estudio del ADN, y argumenta que «por supuesto, la naturaleza química de ciertas cajas negras en la teoría genética clásica fue llenada por el descubrimiento del ADN, ARN, y otras cosas, pero esto no afectó de ninguna manera a la naturaleza de la transmisión genética<sup>xxxiv</sup>».

Yo no voy a entrar en este debate entre biólogos, y mucho menos del lado de los antirreduccionistas. No hay duda de que el ADN ha tenido enorme importancia en muchas áreas de la biología. Más aún, existen *algunos* biólogos cuyo trabajo no ha sido directamente afectado por los descubrimientos en biología molecular. El conocimiento de la estructura del ADN es de poca ayuda para un ecólogo de poblaciones que trata de explicar la diversidad de especies de plantas en las selvas tropicales, ni quizá para un biomecánico que trata de comprender el vuelo de las mariposas. Mi opinión es que, incluso si ningún biólogo recibiera ninguna ayuda en su trabajo de los descubrimientos de la biología molecular, seguiría existiendo un sentido importante en el que Anderson habría estado en lo cierto al hablar sobre el secreto de la vida. No se trata de que el *descubrimiento* del ADN sea fundamental para toda la *ciencia* de la vida, sino más bien de que el propio ADN es fundamental para toda la vida en sí misma. Los organismos vivos son lo que son porque mediante selección natural han llegado a ser

de esta forma, y la evolución es posible porque las propiedades del ADN y moléculas similares permiten a los organismos transmitir su huella genética a su descendencia. Exactamente en este mismo sentido, sean o no útiles los *descubrimientos* de la física de partículas elementales a todos los demás científicos, los *principios* de la física de partículas elementales son fundamentales para toda la naturaleza.

Quienes se oponen al reduccionismo, a menudo, se basan en el argumento de que los descubrimientos en física de partículas elementales no serán útiles probablemente a los científicos de otros campos. Esto no tiene apoyo en la evidencia histórica. La física de partículas elementales de la primera mitad de este siglo fue esencialmente la física de los electrones y los fotones, que tuvieron un efecto enorme e indudable en nuestra comprensión de la materia en cualquiera de sus formas. Los descubrimientos de la física de partículas elementales de hoy ya están teniendo una influencia importante en cosmología y astronomía; por ejemplo, utilizamos nuestro conocimiento de la lista de las partículas elementales para calcular la producción de elementos químicos en los primeros minutos del universo. Nadie puede decir qué otras consecuencias puedan tener estos descubrimientos.

Pero supongamos por un momento, sólo para el propósito de la argumentación, que ningún descubrimiento hecho por los físicos de partículas elementales pudiera volver a afectar al trabajo de los científicos en cualquier otro campo. El trabajo de los físicos de partículas elementales aún seguiría teniendo una importancia

especial. Sabemos que la evolución de los organismos vivientes ha sido posible gracias a las propiedades del ADN y otras moléculas, y que las propiedades de cualquier molécula son las que son debido a las propiedades de los electrones, los núcleos atómicos y las fuerzas eléctricas. ¿Y por qué estas cosas son las que son? Esto ha sido parcialmente explicado por el modelo estándar de las partículas elementales, y ahora queremos dar el siguiente paso y explicar el modelo estándar y los principios de la relatividad y otras simetrías sobre las que está basado. No entiendo cómo esto no puede parecer una tarea importante para cualquiera que sienta curiosidad en por qué el mundo es como es, al margen de cualquier posible uso que la física de partículas elementales pueda tener para cualquier otro científico.

En realidad, las partículas elementales no son muy interesantes en sí mismas, al menos no en la medida en que las personas son interesantes. Aparte de su momento y espín, cualquier electrón en el universo es exactamente igual que cualquier otro electrón: si se ha visto un electrón, se han visto todos. Pero esta misma simplicidad sugiere que los electrones, a diferencia de las personas, no están hechos de constituyentes más fundamentales, sino que ellos mismos son algo próximo a los constituyentes fundamentales de cualquier otra cosa. Es el hecho de que las partículas elementales sean tan aburridas lo que las hace interesantes; su simplicidad sugiere que el estudio de las partículas elementales nos acercará a una comprensión global de la naturaleza.

El ejemplo de la superconductividad a alta temperatura puede servir

para explicar en qué sentido especial y limitado la física de partículas elementales es más fundamental que otras ramas de la física. Precisamente ahora, Anderson y otros físicos de materia condensada están tratando de entender la enigmática persistencia de la superconductividad en ciertos compuestos de cobre, oxígeno y elementos más exóticos a temperaturas muy superiores a las que se habían considerado posibles. Al mismo tiempo, los físicos de partículas elementales están tratando de entender el origen de las masas de los quarks, los electrones y otras partículas en el modelo estándar. (Estos dos problemas resultan estar matemáticamente relacionados; como veremos, ambos se reducen a la cuestión de cómo algunas simetrías de las ecuaciones subyacentes desaparecen en las soluciones de dichas ecuaciones). Los físicos de materia condensada llegarán sin duda a resolver el problema de la superconductividad a alta temperatura sin ninguna ayuda directa de los físicos de partículas elementales, y cuando los físicos de partículas elementales comprendan el origen de la masa, probablemente lo harán sin introducir conceptos directos de la física de materia condensada<sup>25</sup>. La diferencia entre ambos

---

<sup>25</sup> Estoy utilizando aquí la palabra «directo» porque, de hecho, las diferentes ramas de la física se pueden prestar mutuamente una buena ayuda indirecta. Parte de ella es una fertilización cruzada intelectual; los físicos de la materia condensada tomaron algunos de sus principales métodos matemáticos (el llamado método del grupo de renormalización) de la física de partículas, y los físicos de partículas aprendieron mucho acerca del fenómeno llamado ruptura espontánea de simetría de la física de la materia condensada. En su testimonio a favor del proyecto del Supercolisionador en 1987 en las audiencias del comité del Congreso, Robert Schrieffer (que con John Bardeen y Leon Cooper fue uno de los fundadores de nuestra teoría moderna de la superconductividad) hizo hincapié en que él había llegado a su propio trabajo en superconductividad a partir de su experiencia con las teorías de mesones de la física de partículas elementales. [En un artículo reciente, «John Bardeen and the Theory of Superconductivity», *Physics Today* (abril de 1992), p. 46, Schrieffer menciona que su conjetura de 1957 de la función de onda mecanocuántica para un superconductor fue estimulada por un reexamen del trabajo en teoría de campos por Sin-itiro Tomonaga veinte años antes]. Por

problemas es que, cuando los físicos de materia condensada expliquen finalmente la superconductividad a alta temperatura, cualesquiera que sean las brillantes ideas nuevas que se hayan inventado para ello, al final la explicación tomará la forma de una demostración matemática que deduzca la existencia de este fenómeno de las propiedades *conocidas* de los electrones, los fotones y los núcleos atómicos; por el contrario, cuando los físicos de partículas entiendan finalmente el origen de la masa en el modelo estándar, la explicación estará basada en aspectos del modelo estándar sobre los que hoy día estamos bastante inseguros y que no podemos aprender (aunque podamos conjeturar) sin disponer de nuevos datos procedentes de instalaciones como el Supercolisionador. La física de partículas elementales representa así una frontera de nuestro conocimiento de una forma que la física de materia condensada no lo hace.

Esto no resuelve por sí mismo el problema de cómo distribuir los fondos para la investigación. Existen muchos motivos para hacer investigación científica: aplicaciones a la medicina y tecnología, prestigio nacional, ejercitación matemática, y la pura y simple alegría de entender bellos fenómenos, que son satisfechas por otras ciencias tanto como (y a veces mejor) que la física de partículas elementales. Los físicos de partículas no creen que el carácter singularmente fundamental de su obra les gane un primer lugar en

---

supuesto, existen otras maneras en las que las diferentes ramas de la física se pueden ayudar; por ejemplo, las demandas de potencia del Supercolisionador harían el proyecto demasiado caro si no fuera posible construir bobinas magnéticas con cables superconductores; y la radiación sincrotrón emitida como un producto secundario en algunos aceleradores de partículas de alta energía resultan ser de gran valor en medicina y en el estudio de los materiales.

el erario público, pero sí creen que éste no es un factor que pueda ser ignorado sin más en las decisiones sobre el apoyo a la investigación científica.

Posiblemente el intento mejor conocido para establecer baremos para este tipo de decisiones sea el de Alvin Weinberg<sup>26</sup>. En un artículo de 1964, ofrecía esta guía: «así, yo afinaría el criterio de mérito científico proponiendo que, a igualdad en otras cosas, *un campo tiene más mérito científico si contribuye más fuertemente e ilumina más brillantemente a sus disciplinas científicas vecinas*» (la cursiva es suya)<sup>xxxv</sup>. Después de leer un artículo mío sobre estas cuestiones<sup>xxxvi</sup>, Alvin me escribió recordándome su propuesta. Yo no la había olvidado, pero tampoco estaba de acuerdo con ella. Como escribí en respuesta a Alvin, este tipo de razonamiento podría ser utilizado para justificar el gasto de miles de millones de dólares en la clasificación de las mariposas de Texas, sobre la base de que esto iluminaría la clasificación de las mariposas de Oklahoma y, de hecho, de las mariposas en general. Este ejemplo estúpido estaba propuesto sólo para ilustrar que no añade mucho a la importancia de un proyecto científico sin interés el decir que es importante para otros proyectos científicos sin interés. (Probablemente ahora tendré problemas con los lepidopterólogos a quienes les gustaría gastar miles de millones de dólares clasificando las mariposas de Texas).

---

<sup>26</sup> Alvin Weinberg y yo somos amigos, pero no parientes. En 1966, cuando visité Harvard por primera vez, coincidí almorzando en el club de la facultad con el finado John van Vleck, un adusto y viejo patriarca de la física que había sido uno de los primeros en aplicar los nuevos métodos de la mecánica cuántica a la teoría del estado sólido a finales de los años veinte. Van Vleck me preguntó si yo estaba emparentado con «el tal» Weinberg. Me quedé algo desconcertado, pero comprendí lo que quería decir; en aquella época yo era un teórico más bien novel y Alvin era director del Oak Ridge National Laboratory. Hice acopio de atrevimiento y respondí que yo era «el tal» Weinberg. No creo que Van Vleck quedara impresionado.

Pero lo que realmente echo de menos en los criterios de Alvin Weinberg para la elección científica es la falta de una perspectiva *reduccionista*: el hecho de que una de las cosas que hace interesante un trabajo en ciencia es que nos acerca al punto en el que todas nuestras explicaciones convergen.

Algunas de las cuestiones del debate sobre el reduccionismo dentro de la física han sido planteadas de forma muy útil por el escritor James Gleick. (Fue Gleick quien introdujo la física del caos a un público lector general<sup>xxxvii</sup>). En una charla reciente él argumentaba:

El caos es antirreduccionista. Esta nueva ciencia hace una fuerte afirmación sobre el mundo: a saber, que cuando se llega a las cuestiones más interesantes, cuestiones sobre el orden y el desorden, la decadencia y la creatividad, la formación de estructuras y la propia vida, el todo no puede ser explicado en términos de las partes.

Existen leyes fundamentales acerca de los sistemas complejos, pero son leyes de un nuevo tipo. Existen leyes de estructura, organización y escala, y estas leyes simplemente desaparecen cuando nos centramos en los constituyentes individuales de un sistema complejo, igual que la psicología de una turba de linchamiento desaparece cuando se entrevista a los individuos participantes<sup>xxxviii</sup>.

Replicaré en primer lugar que diferentes cuestiones son interesantes de diferentes modos. Ciertamente las cuestiones sobre la creatividad y la vida son interesantes porque estamos vivos y nos gustaría ser creativos. Pero existen otras cuestiones que son interesantes porque



nos acercan al punto de convergencia de nuestras explicaciones. El descubrimiento de las fuentes del Nilo no hizo nada para iluminar los problemas de la agricultura egipcia, pero ¿quién puede decir que no fue interesante?

También yerra el punto en este tipo de cuestión el hablar de explicar el todo «en términos de las partes»; el estudio de los quarks y los electrones es fundamental no porque toda la materia ordinaria esté compuesta de quarks y electrones, sino porque pensamos que estudiando los quarks y los electrones aprenderemos algo sobre los *principios* que gobiernan todas las cosas. (Fue un experimento utilizando electrones disparados contra los quarks en el interior de los núcleos atómicos el que desencadenó la moderna teoría unificada de dos de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, la fuerza débil y la electromagnética). De hecho, el físico de partículas elementales presta hoy más atención a las partículas exóticas que *no* están presentes en la materia ordinaria que a los quarks y los electrones que sí lo están, porque piensa que precisamente ahora las cuestiones que necesitan ser respondidas recibirán más luz del estudio de dichas partículas exóticas. Cuando Einstein explicó la naturaleza de la gravitación en su teoría de la relatividad general, no lo hizo «en términos de las partes» sino en términos de la geometría del espacio y el tiempo. Pudiera ser que los físicos del siglo XXI descubriesen que el estudio de los agujeros negros o la radiación gravitatoria revele más sobre las leyes de la naturaleza que la física de las partículas elementales. Nuestra concentración actual en las partículas elementales se basa en una

apreciación táctica: en *este* momento de la historia de la ciencia ésta es la vía de hacer progresos hacia la teoría final.

Para terminar, está la cuestión de la emergencia: ¿es cierto realmente que existen nuevos tipos de leyes que gobiernan los sistemas complejos? Sí, por supuesto, en el sentido en que los diferentes niveles de experiencia apelan a descripciones y análisis en términos diferentes. Esto mismo es tan cierto para la química como para el caos. Pero ¿nuevos tipos de leyes *fundamentales*? La turba linchadora de Gleick proporciona un contraejemplo. Podemos formular lo que aprendemos sobre las turbas en forma de leyes (tal como los antiguos vieron que las revoluciones siempre devoran a sus hijos), pero, si pedimos una explicación de por qué aparecen tales leyes, no nos quedaríamos muy satisfechos si se nos dijera que las leyes son fundamentales, sin otro tipo de explicación. Antes bien, buscaríamos una explicación reduccionista precisamente en términos de la psicología de los seres humanos individuales. Lo mismo es cierto para la emergencia del caos. El progreso excitante que se ha hecho en los últimos años en esta área no ha tomado forma solamente a partir de la observación de sistemas caóticos y de la formulación de leyes empíricas que los describen; más importante aún ha sido la deducción matemática de las leyes que gobiernan el caos a partir de las leyes físicas microscópicas que gobiernan los sistemas que se hacen caóticos.

Sospecho que todos los científicos en activo (y quizá la mayoría de la gente en general) son en la práctica tan reduccionistas como yo, aunque a algunos como Ernst Mayr y Philip Anderson no les guste

expresarse en estos términos. Por ejemplo, la investigación médica trata problemas tan urgentes y difíciles que las propuestas de nuevas terapias deben estar a menudo basadas en estadísticas médicas, sin entender cómo funciona la terapia; pero incluso si una nueva terapia fuera sugerida por la experiencia con muchos pacientes, probablemente se enfrentaría al escepticismo si uno no pudiera ver cómo puede ser explicada reductivamente en términos de ciencias como la bioquímica y la biología celular. Supongamos que una revista médica publica dos artículos que informan de dos diferentes terapias para la escrófula: una, mediante la ingestión de sopa de pollo, y la otra, mediante el contacto con un rey. Incluso si la evidencia estadística presentada a favor de estas dos terapias tuviera igual peso, creo que la comunidad médica (y cualquier otra) tendría reacciones muy diferentes con respecto a los dos artículos. Respecto a la sopa de pollo, pienso que la mayoría de la gente tendría una mente abierta, reservando el juicio hasta que la terapia pudiera ser confirmada por pruebas independientes. La sopa de pollo es una mezcla complicada de cosas buenas y ¿quién sabe qué efecto podría tener su contenido en las microbacterias que causan la escrófula? Por el contrario, cualquiera que fuese la evidencia estadística ofrecida para demostrar que el contacto de un rey ayuda a curar la escrófula, los lectores tenderían a ser muy escépticos, sospechando un fraude o una coincidencia no significativa, porque no verían la manera de que semejante terapia pudiera ser explicada reductivamente. ¿Qué podría importarle a una microbacteria si la persona que toca a su huésped estaba correctamente coronada y

ungida o fuese el hijo primogénito del monarca anterior? (Incluso en la Edad Media, cuando era creencia común que el contacto con un rey curaría la escrófula, los mismos reyes parecieron haber tenido dudas sobre esto. Por lo que yo sé, en todos los conflictos medievales sobre disputas sucesorias, como entre los Plantagenet y los Valois o los York y los Lancaster, ningún aspirante al trono trató nunca de probar su título demostrando la potencia curativa de su contacto). Hoy día, un biólogo que pretendiera que esta cura no necesita explicación porque el poder del contacto real es una ley autónoma de la naturaleza, tan fundamental como cualquier otra, no encontraría mucho apoyo en sus colegas, porque éstos se guían por una concepción del mundo reduccionista que no deja lugar para tal ley autónoma.

Lo mismo es cierto en todas las ciencias. No prestaríamos mucha atención a una supuesta ley autónoma de la macroeconomía que no tuviera una posible explicación en términos del comportamiento de los individuos, o a una hipótesis sobre la superconductividad que no tuviera una posible explicación en términos de las propiedades de los electrones, los fotones y los núcleos. La actitud reduccionista proporciona un filtro útil que ahorra a los científicos de todos los campos una pérdida de su tiempo en ideas que no son dignas de ser seguidas. En este sentido, todos somos ahora reduccionistas.

### Capítulo 3

#### La mecánica cuántica y sus descontentos

*Un jugador colocó una bola en la mesa de billar y la golpeó con el taco. Viendo rodar la bola, Mr. Tompkins observó con gran sorpresa que la bola empezaba a «ensancharse». No encontraba otra palabra para expresar el extraño comportamiento de la bola que, a medida que se movía por el tapete verde, parecía cada vez más difuminada, perdiendo sus contornos definidos. Parecía como si no hubiera una sola bola rodando sino muchas bolas que se penetraban parcialmente unas a otras. Mr. Tompkins había observado con frecuencia fenómenos análogos antes, pero hoy no había tomado una sola gota de whisky y no podía comprender por qué sucedía.*

*GEORGE GAMOW, Mr. Tompkins en el País de las Maravillas*

El descubrimiento de la mecánica cuántica a mediados de los años veinte constituyó la revolución más profunda en la teoría física desde el nacimiento de la física moderna en el siglo XVII. En la exposición precedente de las propiedades de un trozo de tiza, nuestras cadenas de preguntas nos llevaban una y otra vez a respuestas basadas en la mecánica cuántica. Todas las fantásticas teorías matemáticas que los físicos han desarrollado en los años recientes, las teorías cuánticas de campos, las teorías gauge, las teorías de supercuerdas, están formuladas dentro del marco de la mecánica cuántica. Si existe algo en nuestra comprensión actual de la naturaleza que es probable que sobreviva en una teoría final, ese algo es la mecánica cuántica.

La importancia histórica de la mecánica cuántica no reside sólo en el hecho de que proporcione respuestas a gran número de viejas preguntas acerca de la naturaleza de la materia; mucho más importante es que cambió nuestra idea de las preguntas que podemos plantear. Para los físicos continuadores de Newton, las teorías físicas iban dirigidas a proporcionar una herramienta matemática que permitiera a los físicos calcular las posiciones y las velocidades de las partículas de cualquier sistema en cualquier instante futuro a partir de un conocimiento completo (por supuesto nunca dado en la práctica) de sus valores en un instante dado. Pero la mecánica cuántica introdujo una forma completamente nueva de hablar del estado de un sistema. En mecánica cuántica hablamos de constructos matemáticos llamados funciones de onda que

solamente nos dan información sobre las probabilidades de las diversas posiciones y velocidades posibles. Tan profundo es este cambio que los físicos utilizan ahora la palabra «clásico» no para referirse a lo «grecorromano», o a «Mozart, etc.», sino más bien en el sentido de «anterior a la mecánica cuántica».

Si existe un momento que marca el nacimiento de la mecánica cuántica, éste sería unas vacaciones que se tomó el joven Werner Heisenberg en 1925. Padeciendo la fiebre del heno, Heisenberg abandonó los campos en flor próximos a Gotinga para ir a la solitaria isla de Helgoland en el mar del Norte. Heisenberg y sus colegas habían estado luchando durante varios años con un problema planteado en 1913 por la teoría del átomo de Niels Bohr: ¿por qué los electrones en los átomos ocupan sólo ciertas órbitas permitidas con ciertas energías definidas? En Helgoland, Heisenberg adoptó un nuevo punto de partida. Decidió que, puesto que nadie podría nunca observar directamente la órbita de un electrón en un átomo, él trataría sólo con cantidades que pudieran ser medidas: en concreto, con las energías de los *estados* cuánticos en los que todos los electrones del átomo ocupan órbitas permitidas y con los ritmos a los que un átomo puede hacer espontáneamente una transición de cualquiera de estos estados cuánticos a cualquier otro emitiendo una partícula de luz, un fotón. A partir de estos ritmos, Heisenberg formó lo que llamó una «tabla», e introdujo operaciones matemáticas en su tabla que daban lugar a nuevas tablas, un tipo de tabla para cada cantidad física tal como la posición, la velocidad o el cuadrado

de la velocidad de un electrón<sup>27</sup>. Sabiendo cómo depende la energía de una partícula en un sistema simple de su velocidad y su posición, Heisenberg pudo de esta forma calcular una tabla de las energías del sistema en sus diversos estados cuánticos, en una especie de remedo de la forma en que la energía de un planeta se calcula en la física de Newton a partir del conocimiento de su posición y velocidad.

Si el lector está desconcertado con lo que Heisenberg estaba haciendo, él o ella no está solo. Varias veces he tratado de leer el artículo que Heisenberg escribió de regreso de Helgoland y, aunque creo que entiendo la mecánica cuántica, nunca he entendido las motivaciones de Heisenberg para los pasos matemáticos de su artículo. Los físicos teóricos en sus trabajos más importantes tienden a desempeñar uno de dos papeles: o son *sabios* o son *magos*. El físico-sabio razona de una forma ordenada sobre problemas físicos basándose en ideas fundamentales sobre el modo en que la naturaleza debería comportarse. Einstein, por ejemplo, al desarrollar la teoría de la relatividad general estaba desempeñando el papel de un sabio; él tenía un problema bien definido, el problema de cómo adaptar la teoría de la gravitación a la nueva concepción del espacio y del tiempo que había propuesto en 1905 como teoría de la relatividad especial. Tenía algunas claves valiosas, en

---

<sup>27</sup> Dicho más exactamente, las entradas en la tabla de Heisenberg eran lo que se denomina amplitudes de transición, cantidades cuyos cuadrados dan los ritmos de transición. Heisenberg se enteró, después de regresar a Gotinga desde Helgoland, de que sus operaciones matemáticas en dichas tablas eran ya bien conocidas por los matemáticos; los matemáticos conocían tales tablas como matrices, y la operación mediante la que uno va desde la tabla que representa la velocidad de un electrón a la tabla que representa su cuadrado se conocía como multiplicación de matrices. Éste es un ejemplo de la sorprendente capacidad de los matemáticos para anticipar estructuras que son relevantes para el mundo real.



particular el hecho notable descubierto por Galileo de que el movimiento de cuerpos pequeños en un campo gravitatorio es independiente de la naturaleza de los cuerpos. Esto le sugirió que la gravitación debía ser una propiedad del propio espacio-tiempo. Einstein tenía también a su disposición una teoría matemática bien desarrollada de los espacios curvos que había sido propuesta por Riemann y otros matemáticos en el siglo XIX. Hoy día es posible enseñar la relatividad general siguiendo muy de cerca las mismas líneas de razonamiento que utilizó Einstein cuando finalmente escribió su trabajo de 1915. Por otro lado, están los físicos-magos, que no parecen estar razonando en absoluto, sino que se saltan todos los pasos intermedios para llegar a una nueva intuición acerca de la naturaleza. Los autores de libros de texto de física normalmente se ven obligados a rehacer el trabajo de los magos para que puedan aparecer como sabios; de otra forma ningún lector entendería la física. Planck fue un mago al inventar su teoría de la radiación térmica en 1900, y Einstein estaba desempeñando el papel de un mago cuando propuso la idea del fotón en 1905. (Quizá por esta razón, describió posteriormente la teoría del fotón como lo más revolucionario que había hecho). Normalmente no es difícil comprender los artículos de los físicos-sabios, pero los artículos de los físicos-magos son con frecuencia incomprensibles. En este sentido, el artículo de Heisenberg de 1925 era pura magia.

Quizá no deberíamos examinar muy en detalle el primer artículo de Heisenberg. Heisenberg estaba en contacto con varios físicos teóricos muy dotados, incluyendo a Max Born y Pascual Jordan en

Alemania y a Paul Dirac en Inglaterra, y antes de finalizar 1925 ellos habían modelado las ideas de Heisenberg en una versión comprensible y sistemática de la mecánica cuántica, hoy llamada mecánica de matrices. En enero del año siguiente, en Hamburgo, el antiguo discípulo de Heisenberg, Wolfgang Pauli, fue capaz de resolver mediante el uso de la nueva mecánica de matrices el problema paradigmático de la física atómica, el cálculo de las energías de los estados cuánticos del átomo de hidrógeno, y justificar así los anteriores resultados *ad hoc* de Bohr.

El cálculo mecanocuántico de los niveles energéticos del hidrógeno por Pauli fue una exhibición de brillantez matemática, un uso sagaz de las reglas de Heisenberg y las simetrías especiales del átomo de hidrógeno. Aunque Heisenberg y Dirac quizá hayan sido incluso más creativos que Pauli, ningún físico en el mundo fue más perspicaz. Pero ni siquiera Pauli fue capaz de extender su cálculo al siguiente átomo más simple, el del helio, y mucho menos a átomos o moléculas más pesados.

La mecánica cuántica que hoy se enseña en los cursos de licenciatura y que usan los químicos y los físicos en su trabajo cotidiano no es, de hecho, la mecánica de matrices de Heisenberg, Pauli y sus colaboradores, sino un formalismo matemáticamente equivalente, aunque mucho más conveniente, introducido un poco más tarde por Erwin Schrödinger. En la versión de Schrödinger de la mecánica cuántica, cada posible estado físico de un sistema viene descrito por una expresión conocida como la *función de onda* del sistema, de una forma en cierto modo similar a la descripción de la

luz como una onda de campos eléctrico y magnético. La aproximación ondulatoria a la mecánica cuántica había aparecido antes del trabajo de Heisenberg, en los artículos de Louis de Broglie de 1923 y en su tesis doctoral en París de 1924. De Broglie conjeturó que el electrón puede ser considerado como un cierto tipo de onda, con una longitud de onda que está relacionada con el momento del electrón de la misma forma que las longitudes de onda de la luz están relacionadas, según Einstein, con el momento de los fotones: en ambos casos, la longitud de onda es igual a una constante fundamental de la naturaleza, conocida como constante de Planck, dividida por el momento. De Broglie no tenía ninguna idea del significado físico de la onda y no inventó ningún tipo de ecuación de onda dinámica; simplemente supuso que las órbitas permitidas para los electrones en un átomo de hidrógeno tenían que tener la longitud de onda precisa para que cierto número entero de longitudes de onda encajase en la órbita: una longitud de onda en el estado de energía más baja, dos longitudes de onda en el siguiente estado, y así sucesivamente. De forma notable, esta sencilla y no muy bien justificada conjetura dio las mismas respuestas acertadas para las energías de las órbitas del electrón en el átomo de hidrógeno que los cálculos de Bohr habían dado una década antes. Con esta tesis doctoral a sus espaldas, podría haberse esperado que De Broglie continuara resolviendo todos los problemas de la física. En realidad, él no hizo prácticamente nada más de importancia científica en toda su vida. Fue Schrödinger en Zurich quien, en 1925-1926, transformó las más bien vagas ideas de De Broglie

sobre las ondas electrónicas en un formalismo matemático preciso y coherente que se aplicaba a los electrones o a cualquier otra partícula en cualquier tipo de átomo o molécula. Schrödinger fue también capaz de demostrar que su «mecánica ondulatoria» es equivalente a la mecánica de matrices de Heisenberg; cualquiera de ellas puede ser deducida matemáticamente a partir de la otra.

En el corazón del enfoque de Schrödinger había una ecuación dinámica (conocida desde entonces como la ecuación de Schrödinger) que dictaba la forma en que cualquier partícula dada cambiaría con el tiempo. Algunas de las soluciones de la ecuación de Schrödinger para los electrones en los átomos oscilan simplemente con una sola frecuencia pura, como la onda sonora producida por un perfecto diapasón. Estas soluciones especiales corresponden a los posibles estados cuánticos estables del átomo o de la molécula (de un modo similar a las vibraciones estables en un diapasón), y la energía del estado atómico viene dada por la frecuencia de la onda multiplicada por la constante de Planck. Éstas son las energías que se nos manifiestan a través de los colores de la luz que el átomo puede emitir o absorber.

Matemáticamente hablando, la ecuación de Schrödinger pertenece al mismo tipo de ecuaciones (conocidas como ecuaciones diferenciales en derivadas parciales) que habían venido siendo utilizadas desde el siglo XIX para estudiar las ondas sonoras o luminosas. Los físicos de los años veinte se sentían ya tan cómodos con este tipo de ecuación de ondas que inmediatamente pudieron ponerse a calcular las energías y otras propiedades de todo tipo de

átomos y moléculas. Fue una época dorada para la física. Otros éxitos llegaron rápidamente y, uno a uno, los misterios que habían rodeado a los átomos y las moléculas parecían desvanecerse.

A pesar de estos éxitos, ni De Broglie ni Schrödinger ni ningún otro sabía al principio qué tipo de magnitud física era la que oscilaba en una onda electrónica. Cualquier tipo de onda queda descrita en cualquier instante dado mediante una lista de números, un número para cada punto del espacio por el que viaja la onda<sup>28</sup>. Por ejemplo, en una onda sonora los números dan la presión del aire en cada punto del mismo. En una onda luminosa, los números dan las intensidades y direcciones de los campos eléctrico y magnético en cada punto del espacio a través del que viaja la luz. Análogamente, la onda electrónica también podía describirse en cualquier instante mediante una lista de números, un número para cada punto del espacio dentro y en el entorno del átomo<sup>29</sup>. Esta lista es lo que se conoce como la función de onda, y los números individuales son los valores de la función de onda. Pero al principio todo lo que se podía decir sobre la función de onda es que era una solución de la ecuación de Schrödinger; nadie sabía aún qué magnitud física estaba siendo descrita mediante estos números.

Los teóricos cuánticos de mediados de los años veinte estaban en la

---

<sup>28</sup> Por supuesto existe un número infinito de puntos en cualquier volumen espacial, y realmente no es posible enumerar los puntos que representan una onda. Pero a fines de visualización (y a menudo en los cálculos numéricos) es posible imaginar que el espacio consiste en un número muy grande pero finito de puntos que se extienden a través de un volumen grande pero finito.

<sup>29</sup> Estos números son en realidad números complejos, en el sentido de que generalmente incluyen la cantidad simbolizada mediante la letra  $i$ , igual a la raíz cuadrada de menos uno, tanto como números ordinarios, positivos y negativos. La parte de cualquier número complejo proporcional a  $i$  se llama parte imaginaria; el resto se llama parte real. Pasaré por alto esta complicación porque, aunque es importante, no afecta realmente a las puntualizaciones que quiero hacer sobre la mecánica cuántica.

misma posición que los físicos que estudiaban la luz a comienzos del siglo XIX. La observación de fenómenos como la difracción (el hecho de que los rayos de luz no sigan líneas rectas cuando pasan muy cerca de los objetos o a través de agujeros muy pequeños) había sugerido a Thomas Young y Augustin Fresnel que la luz era algún tipo de onda y que no viajaba en línea recta cuando se le forzaba a pasar a través de agujeros pequeños debido a que los agujeros eran más pequeños que su longitud de onda. Pero nadie a comienzos del siglo XIX sabía *qué* era lo que oscilaba en la luz; sólo con el trabajo de James Clerk Maxwell en la década de los sesenta se hizo claro que la luz era una oscilación de campos eléctricos y magnéticos variables. Pero ¿qué es lo que está variando en una onda electrónica?

La respuesta vino de un estudio teórico del comportamiento de los electrones libres cuando son disparados contra los átomos. Es natural describir un electrón que viaja por el espacio vacío como un paquete de ondas, un pequeño racimo de ondas electrónicas que viajan juntas, como el pulso de ondas luminosas producido por una linterna que se enciende durante un breve instante. La ecuación de Schrödinger muestra que cuando tal paquete de ondas choca con un átomo, se rompe<sup>30</sup>; las ondas componentes del paquete se dispersan en todas direcciones como las salpicaduras de agua cuando el chorro de una manguera incide sobre una roca. Esto

---

<sup>30</sup> En realidad, el paquete de ondas del electrón comienza a romperse aun antes de que el electrón golpee al átomo. Finalmente se llegó a comprender que esto se debe al hecho de que, según la interpretación probabilística de la mecánica cuántica, el paquete de ondas no representa un electrón con una velocidad definida, sino con una distribución de diferentes velocidades posibles.

resultaba enigmático: los electrones que golpean los átomos salen en una dirección u otra, pero no se deshacen; siguen siendo electrones. En 1926, en Gotinga, Max Born propuso interpretar este comportamiento peculiar de la función de onda en términos de probabilidades. El electrón no se rompe, sino que puede ser dispersado en cualquier dirección, y la probabilidad de que un electrón sea dispersado en una dirección particular es mayor para aquellas direcciones en las que los valores de la función de onda sean más altos. En otras palabras, las ondas electrónicas no son ondas *de nada*; su significado es sencillamente que el valor de la función de onda en cualquier punto nos da la probabilidad de que el electrón esté en o cerca de dicho punto.

Ni Schrödinger ni De Broglie se sintieron cómodos con esta interpretación de las ondas electrónicas, lo que probablemente explica por qué ninguno de ellos contribuyó de forma importante al desarrollo posterior de la mecánica cuántica. Pero la interpretación probabilística de las ondas electrónicas encontró apoyo en un argumento notable ofrecido por Heisenberg el año siguiente. Heisenberg consideró los problemas que surgen cuando un físico se propone medir la posición y el momento de un electrón. Para hacer una medición precisa de la posición es necesario utilizar luz de corta longitud de onda porque la difracción siempre emborrona las imágenes de cualquier cosa más pequeña que una longitud de onda de la luz. Pero la luz de corta longitud de onda consiste en fotones con un momento alto y cuando fotones de momento alto son utilizados para observar un electrón, el electrón necesariamente

retrocede a consecuencia del impacto, llevándose una fracción del momento del fotón. De este modo, cuanto más precisamente tratamos de medir la posición de un electrón, menos sabemos sobre el momento del electrón después de la medición. Esta regla ha llegado a ser conocida como el *principio de incertidumbre de Heisenberg*<sup>31</sup>. Una onda electrónica que esté muy localizada en cierta posición representa un electrón que tiene una posición bien definida pero que tiene un momento que podría tomar prácticamente cualquier valor. Por el contrario, una onda electrónica que toma la forma de una suave y equiespaciada alternancia de crestas y valles que se extienden sobre muchas longitudes de onda representa un electrón que tiene un momento bien definido, pero cuya posición es muy incierta<sup>32</sup>. Los electrones más típicos, como aquellos que se encuentran en átomos o moléculas, no tienen ni un momento ni una posición definida.

---

<sup>31</sup> Para ser un poco más exactos, puesto que la longitud de onda de la luz es igual a la constante de Planck dividida por el momento del fotón, la incertidumbre en la posición de cualquier partícula no puede ser menor que la constante de Planck dividida por la incertidumbre en su momento. No notamos esta incertidumbre en los objetos ordinarios, como las bolas de billar, debido a que la constante de Planck es muy pequeña. En el sistema de unidades con el que los físicos están más familiarizados, basado en el centímetro, el gramo y el segundo como unidades fundamentales de longitud, masa y tiempo, la constante de Planck vale 6,626 milésimas de millonésima de millonésima de millonésima, es decir, una coma decimal seguida de veintiséis ceros y a continuación 6626. La constante de Planck es tan pequeña que la longitud de onda de una bola de billar que rueda por una mesa es mucho menor que el tamaño de un núcleo atómico, y por ello no hay dificultad en hacer mediciones bastantes precisas de la posición y el momento de la bola al mismo tiempo.

<sup>32</sup> Esta descripción puede dar la errónea impresión de que en un estado con momento definido existe una alternancia entre puntos donde no es probable que estén los electrones, en los que los valores correspondientes de la función de onda son los más bajos, y puntos donde es más probable que esté el electrón, en los que los valores de la función de onda son los más altos. Esto no es correcto a causa del hecho mencionado en una nota anterior de que la función de onda es compleja. Existen realmente dos partes de cada valor de la función de onda, llamadas partes real e imaginaria, que están mutuamente fuera de fase: cuando uno es pequeño, el otro es grande. La probabilidad de que un electrón esté en una pequeña región concreta es proporcional a la suma de los cuadrados de las dos partes del valor de la función de onda para la posición, y esta suma es estrictamente constante para un estado de momento definido.



Los físicos continuaron discutiendo sobre la interpretación de la mecánica cuántica muchos años después de que se hubiesen habituado a resolver la ecuación de Schrödinger. Einstein fue un caso singular al rechazar la mecánica cuántica en su trabajo; la mayoría de los físicos simplemente estaban tratando de entenderla. Gran parte de este debate tuvo lugar en el Instituto Universitario de Física Teórica de Copenhague bajo la guía de Niels Bohr<sup>33</sup>. Bohr se centró especialmente en una característica peculiar de la mecánica cuántica que denominó *complementariedad*: el conocimiento de un aspecto de un sistema impide el conocimiento de algunos otros aspectos del mismo<sup>xxxix</sup>. El principio de incertidumbre de Heisenberg proporciona un ejemplo de complementariedad: el conocimiento de la posición (o del momento) de una partícula impide el conocimiento del momento (o de la posición) de la partícula<sup>34</sup>.

Hacia 1930 las discusiones en el instituto de Bohr habían conducido a una formulación ortodoxa «de Copenhague» de la mecánica cuántica, en términos que ahora eran mucho más generales que la mecánica ondulatoria de electrones individuales. Ya esté constituido un sistema por una o por muchas partículas, su estado en cualquier instante se describe mediante la lista de

---

<sup>33</sup> Tuve la suerte de conocer a Bohr, aunque fue al final de su carrera y al comienzo de la mía. Bohr fue mi anfitrión cuando yo fui a pasar mi primer año de estudios de postgrado a su instituto de Copenhague. Sin embargo, sólo hablamos un tiempo muy breve y estuvo lejos de ser una conversación erudita: Bohr era famoso por hablar mascullando, y siempre resultaba difícil comprender lo que él quería expresar. Recuerdo la expresión horrorizada del rostro de mi mujer cuando Bohr le habló durante bastante tiempo en una reunión en el invernadero de su casa y ella se dio cuenta de que no entendía nada de lo que el gran hombre le estaba diciendo.

<sup>34</sup> En años posteriores, Bohr hizo énfasis en la importancia de la complementariedad en materias muy alejadas de la física. Se cuenta que a Bohr se le preguntó una vez en Alemania cuál era la cualidad complementaria de la verdad (*wahrheit*). Después de reflexionar un momento, respondió que la claridad (*klarheit*). He sentido la fuerza de este comentario al escribir este capítulo.

números conocidos como los valores de la función de onda, correspondiendo un número a cada configuración posible del sistema. Un mismo estado puede describirse dando los valores de la función de onda para configuraciones que están caracterizadas de varias formas diferentes; por ejemplo, caracterizadas mediante la posición de todas las partículas del sistema, o mediante los momentos de todas las partículas del sistema o de varias otras formas, aunque no mediante las posiciones *y* los momentos de todas las partículas simultáneamente.

La esencia de la interpretación de Copenhague está en una drástica separación entre el propio sistema y el aparato utilizado para medir su configuración. Tal como Max Born había señalado, durante los intervalos entre mediciones los valores de la función de onda evolucionan de un modo perfectamente continuo y determinista, dictado por una versión generalizada de la ecuación de Schrödinger. Mientras esto sigue así no se puede decir que el sistema esté en ninguna configuración definida. Pero si ahora medimos la configuración del sistema (por ejemplo, midiendo todas las posiciones de las partículas o todos sus momentos, pero no ambos a la vez), el sistema salta a un estado que definitivamente está en una configuración o en otra, con probabilidades dadas por los cuadrados de los valores de la función de onda para dichas configuraciones inmediatamente antes de la medición<sup>35</sup>.

Describir la mecánica cuántica solamente con palabras da inevitablemente sólo una vaga impresión de lo que realmente es. La

---

<sup>35</sup> Estrictamente hablando, es la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria de los valores de la función de onda la que da las probabilidades de las diversas configuraciones.

mecánica cuántica en sí misma no es imprecisa; aunque al principio parezca extraña, proporciona una herramienta precisa para calcular energía, ritmos de transición y probabilidades. Quiero tratar de introducir al lector un poco más en la mecánica cuántica, y para ello consideraré aquí el tipo de sistema más sencillo posible, un sistema que sólo tiene dos configuraciones posibles. Podemos pensar que este sistema consiste en una partícula hipotética con sólo dos posiciones, digamos *aquí* y *allí*, en lugar de un número infinito de posiciones posibles<sup>36</sup>. El estado del sistema en cualquier instante queda entonces descrito mediante dos números: los valores *aquí* y *allí* de la función de onda.

En la física clásica la descripción de nuestra partícula hipotética es muy simple: está definitivamente *aquí* o *allí*, aunque pueda saltar de *aquí* a *allí* o viceversa de una forma dictada por alguna ley dinámica. Las cosas son más complicadas en mecánica cuántica. Cuando no estamos observando la partícula, el estado del sistema podría ser puramente *aquí*, en cuyo caso el valor *allí* de la función

---

<sup>36</sup> Las partículas en el mundo real no están desde luego limitadas a sólo dos posiciones, pero existen sistemas físicos que para propósitos prácticos pueden ser considerados como teniendo sólo dos configuraciones. El espín de un electrón proporciona un ejemplo en el mundo real de un tal sistema de dos estados. (El espín o el momento angular de cualquier sistema es una medida de la rapidez con que está girando, de cuán masivo es, y de cuál es la distancia de la masa respecto al eje de rotación. Se considera que tiene una dirección alineada a lo largo del eje de rotación). En mecánica clásica el espín de un giróscopo o de un planeta podría tener cualquier magnitud y dirección. En mecánica cuántica, por el contrario, si medimos la magnitud del espín de un electrón a lo largo de cualquier dirección, por ejemplo, la dirección norte (normalmente midiendo la energía de su interacción con un campo magnético en dicha dirección), podemos obtener sólo uno de dos resultados: el electrón está girando o bien en el sentido de las agujas del reloj o bien en sentido contrario en torno a dicha dirección, pero la magnitud del espín es siempre la misma: la magnitud del espín del electrón en torno a cualquier dirección es igual a la constante de Planck dividida por  $4\pi$ , o alrededor de una centésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de millonésima del espín de la Tierra en torno a su eje.

de onda desaparecería, o puramente *allí*, en cuyo caso el valor *aquí* de la función de onda desaparecería, pero también es posible (y más habitual) que ninguno de los valores desaparezca y que la partícula no esté definitivamente *aquí* ni definitivamente *allí*. Si miramos para ver si la partícula está *aquí* o *allí* encontramos, por supuesto, que está en una posición o en otra: la probabilidad de que resulte estar *aquí* está dada por el cuadrado del valor *aquí* inmediatamente antes de la medición, y la probabilidad de que esté *allí* está dada por el cuadrado del valor *allí*<sup>37</sup>. Según la interpretación de Copenhague, cuando medimos si la partícula está en la configuración *aquí* o en la configuración *allí*, los valores de la función de onda saltan a nuevos valores: o bien el valor *aquí* se hace igual a uno y el valor *allí* se hace igual a cero, o viceversa, pero conociendo la función de onda no podemos predecir exactamente qué sucederá, sino sólo sus probabilidades.

---

<sup>37</sup> La suma de estas dos probabilidades debe dar uno (es decir, 100 por 100), de modo que la suma de los cuadrados de los valores *aquí* y *allí* debe ser igual a uno. Esto sugiere una imagen geométrica muy útil. Dibujar un triángulo rectángulo, con un cateto horizontal que tenga una longitud igual al valor *aquí* de la función de onda y un cateto vertical que tenga una longitud igual al valor *allí*. (Por supuesto, por horizontal y vertical estoy entendiendo solamente dos direcciones perpendiculares cualesquiera. Yo podría decir exactamente igual hacia arriba y cruzada). Usted no tiene que ser un general de división moderno para conocer una bonita propiedad del cuadrado de la hipotenusa de este triángulo: es igual a la suma de los cuadrados de los lados horizontal y vertical. Pero, como hemos visto, esta suma tiene el valor uno, de modo que la hipotenusa tiene longitud uno. (Por uno no quiero decir un metro o un pie, ya que las probabilidades no se miden en metros cuadrados o en pies cuadrados; yo entiendo el puro número uno). A la inversa, si se nos da una flecha de longitud unidad con alguna dirección definida en dos dimensiones (en otras palabras, un vector unidad bidimensional), entonces su proyección sobre direcciones horizontal y vertical, o cualquier otro par de direcciones perpendiculares, da un par de números cuyos cuadrados necesariamente suman uno. Así, en lugar de especificar un valor *aquí* y un valor *allí*, el estado puede ser también representado por una flecha (la hipotenusa de nuestro triángulo) de longitud igual a uno, cuya proyección en cualquier dirección es el valor de la función de onda para la configuración del sistema que corresponde a dicha dirección. Esta flecha se denomina *vector de estado*. Dirac desarrolló una formulación de la mecánica cuántica algo más abstracta basada en vectores de estado, que tiene ventajas sobre la formulación basada en funciones de onda, porque podemos hablar de un vector de estado sin referencia a ninguna configuración particular del sistema.

Este sistema con sólo dos configuraciones es tan sencillo que su ecuación de Schrödinger puede describirse sin símbolos. En el intervalo entre mediciones el ritmo de cambio del valor *aquí* de la función de onda es igual al producto de una cierta constante numérica por el valor *aquí* más el producto de una segunda constante multiplicada por el valor *allí*, el ritmo de cambio del valor *allí* es igual al producto de una tercera constante por el valor *aquí* más el producto de una cuarta constante por el valor *allí*. Estas cuatro constantes se conocen colectivamente como el *hamiltoniano* de este sistema simple. El hamiltoniano caracteriza al propio sistema más que a cualquier estado particular del mismo; nos dice todo lo que hay que saber sobre la evolución del estado del sistema a partir de condiciones iniciales dadas. Por sí sola, la mecánica cuántica no nos dice cuál es el hamiltoniano; el hamiltoniano tiene que ser derivado a partir del conocimiento teórico y experimental de la naturaleza del sistema en cuestión<sup>38</sup>.

Este sistema simple puede ser utilizado también para ilustrar la idea de Bohr de la complementariedad, considerando otras maneras de describir el estado de la misma partícula. Por ejemplo, existen un par de estados, algo parecido a estados de momento definido, que podríamos llamar *parada* y *marcha*, en el primero de los cuales el

---

<sup>38</sup> Por supuesto, la mayoría de los sistemas dinámicos son más complejos que nuestra partícula hipotética. Por ejemplo, consideremos dos de tales partículas. Existen aquí cuatro configuraciones posibles, en las que las partículas uno y dos son respectivamente *aquí* y *aquí*, *aquí* y *allí*, *allí* y *aquí*, y *allí* y *allí*. De este modo, la función de onda para el estado de las dos partículas tiene cuatro valores, y se necesitan dieciséis constantes para describir su evolución en el tiempo. Nótese que sigue habiendo sólo una función de onda que describe el estado conjunto de las dos partículas. Éste es el caso generalmente; no tenemos una función de onda independiente para cada electrón u otra partícula, sino sólo una función de onda para cualquier sistema, cualesquiera que sean las partículas que pueda contener.

valor *aquí* de la función de onda es igual al valor *allí*, y en el segundo, el valor *aquí* es igual al valor *allí* cambiado de signo<sup>39</sup>. Podemos, si así lo queremos, describir la función de onda en términos de sus valores *parada* y *marcha* en lugar de sus valores *aquí* y *allí*: el valor *parada* es la suma de los valores *aquí* y *allí*, y el valor *marcha* es su diferencia. Si nosotros supiéramos que la posición de la partícula es definitivamente *aquí*, entonces el valor *allí* de la función de onda debe anularse y, por lo tanto, los valores *parada* y *marcha* de la función de onda deben ser iguales, lo que significa que no sabemos nada sobre el momento de la partícula; ambas posibilidades tienen un 50 por 100 de probabilidad. A la inversa, si supiéramos que la partícula está definitivamente en el estado *parada* con momento cero, entonces el valor *marcha* de la función de onda se anula y, puesto que el valor *marcha* es la diferencia de los valores *aquí* y *allí*, los valores *aquí* y *allí* deben en este caso ser iguales, lo que significa que no sabemos nada acerca de si la partícula está *aquí* o *allí*; la probabilidad de cada uno de ellos es del 50 por 100. Vemos que existe una completa complementariedad entre una medición *aquí-o-allí* y una medición *marcha-o-parada*: podemos hacer una de las dos mediciones, pero cualquiera que escojamos nos deja completamente en la oscuridad

---

<sup>39</sup> Al decir que estos estados tienen momento definido, estoy hablando de forma imprecisa. Con sólo dos posiciones posibles, el estado *marcha* es lo más que nos podemos acercar a una onda suave con una cresta *aquí* y un nodo *allí*, correspondiente a una partícula con un momento no nulo; mientras que el estado *parada* es como una onda llana, para la que la longitud de onda es mucho mayor que la distancia de *aquí* a *allí*, y corresponde a una partícula en reposo. Ésta es una versión muy primaria de lo que los matemáticos llaman análisis de Fourier. (Estrictamente hablando debemos tomar los valores *parada* y *marcha* de la función de onda como la suma o la diferencia de los valores *aquí* y *allí* dividida por la raíz cuadrada de dos para satisfacer la condición mencionada en una nota previa de que la suma de los cuadrados de los dos valores debe ser igual a uno).

sobre los resultados que hubiéramos encontrado de hacer la otra medición.

Todo el mundo está de acuerdo en cómo utilizar la mecánica cuántica, pero existen serias discrepancias sobre lo que estamos haciendo cuando la utilizamos. Para algunos que se sienten heridos por el reduccionismo y el determinismo de la física newtoniana, dos aspectos de la mecánica cuántica parecían ofrecer un bálsamo reparador. Allí donde la física newtoniana no concedía ningún estatus especial a los seres humanos, la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica les concede un papel esencial al dar significado a la función de onda mediante el acto de la medición. Y donde el físico newtoniano hablaba de predicciones exactas, el físico mecanocuántico ofrece ahora sólo cálculos de probabilidades, pareciendo así dejar lugar de nuevo al libre albedrío humano o a la intervención divina.

Algunos científicos y escritores como Fritjof Capra dan la bienvenida a lo que ven como una oportunidad para una reconciliación entre el espíritu de la ciencia y la parte más noble de nuestra naturaleza<sup>x1</sup>. Yo lo haría también si pensara que la oportunidad es real, pero no pienso que sea así. La mecánica cuántica ha sido abrumadoramente importante para la física, pero no puedo encontrar en la mecánica cuántica ningún mensaje para la vida humana que difiera de algún modo importante de los de la física newtoniana.

Puesto que estas cuestiones son aún controvertidas, he persuadido a dos figuras bien conocidas para que las debatan aquí:

Un diálogo sobre el significado de la mecánica cuántica

PEQUEÑO TIM: Pienso que la mecánica cuántica es maravillosa. Nunca me gustó la forma en que, según la mecánica newtoniana, si tú supieras la posición y velocidad de todas las partículas en un instante dado, podrías predecirlo todo sobre el futuro, sin lugar para el libre albedrío y sin ningún papel especial para los seres humanos. Ahora, en la mecánica cuántica, todas tus predicciones son vagas y probabilísticas, y nada tiene un estado definido hasta que los seres humanos lo observan. Estoy seguro que algunos místicos orientales deben haber dicho algo parecido.

SCROOGE: ¡Bah! Puedo haber cambiado de idea sobre la Navidad, pero aún reconozco a un farsante cuando lo oigo. Es cierto que el electrón no tiene una posición y un momento definidos al mismo tiempo, pero esto sólo quiere decir que no son éstas las magnitudes apropiadas que debemos utilizar para describir un electrón. Lo que un electrón o cualquier conjunto de partículas tiene en un instante dado es una función de onda. Si hay un ser humano observando las partículas, entonces el estado del sistema global, incluyendo al ser humano, está descrito por una función de onda. La evolución de la función de onda es tan determinista como las órbitas de las partículas en la mecánica newtoniana. En realidad, es más determinista, porque las ecuaciones que nos dicen cómo evoluciona la función de onda con el tiempo son demasiado sencillas como para permitir soluciones caóticas<sup>40</sup>. ¿Dónde está ahora tu libre albedrío?

---

<sup>40</sup> A veces, los físicos utilizan el término «caos cuántico» para referirse a las propiedades de sistemas cuánticos que *serían* caóticos en la física clásica, pero los propios sistemas cuánticos nunca son caóticos.



PEQUEÑO TIM: Realmente estoy sorprendido de que tú me repliques de una forma tan poco científica. La función de onda no tiene realidad objetiva porque no puede ser medida. Por ejemplo, si observamos que una partícula está *aquí*, no podemos concluir de esto que la función de onda *antes* de la observación tuviera un valor *allí* nulo; podría haber tenido cualquier valor *aquí* y *allí*, y la partícula sólo se mostraría como *aquí* y no como *allí* cuando fuera observada. Si la función de onda no es real, entonces ¿por qué pones tanto énfasis en el hecho de que evoluciona de forma determinista? Todo lo que nosotros medimos son magnitudes tales como posiciones o momentos o espines, y sobre éstos sólo podemos predecir probabilidades. Y hasta que algún ser humano interviene para medir estas magnitudes, no podemos decir que la partícula tenga ningún estado definido.

SCROOGE: Mi querido joven, parece haberte atiborrado acriticamente de la doctrina del siglo XIX llamada positivismo, que dice que la ciencia sólo debería interesarse por las cosas que pueden realmente ser observadas. Estoy de acuerdo en que no es posible medir una función de onda en un solo experimento. ¿Y qué? Repitiendo las mediciones muchas veces para el mismo estado inicial, tú puedes calcular cuál debe ser la función de onda en dicho estado y utilizar los resultados para comprobar nuestras teorías. ¿Qué más quieres? Tú realmente deberías acomodar tu pensamiento al siglo XX. Las funciones de onda son reales por la misma razón por la que lo son los quarks y las simetrías: porque es útil incluirlas en nuestras teorías. Cualquier sistema está en un

estado definido, *haya seres humanos observándolo o no*; el estado no viene descrito mediante una posición o un momento, sino mediante una función de onda.

PEQUEÑO TIM: Creo que no voy a discutir sobre lo que es real o no lo es con alguien que pasa sus tardes paseando con fantasmas. Déjame sólo recordarte un problema serio en el que caes cuando imaginas que la función de onda es real. Este problema fue mencionado en un ataque a la mecánica cuántica que hizo Einstein en la Conferencia Solvay de 1933 en Bruselas<sup>41</sup>, y luego en 1935 en un artículo escrito por él con Boris Podolsky y Nathan Rosen. Supongamos que tenemos un sistema consistente en dos electrones, preparado de tal modo que en cierto instante los electrones tienen una separación conocida y un momento total conocido. (Esto no viola el principio de incertidumbre de Heisenberg. Por ejemplo, la separación podría medirse de forma tan precisa como quisiéramos enviando rayos de luz de muy corta longitud de onda de un electrón a otro; esto perturbaría el momento individual de cada electrón, pero, debido a la conservación del momento, no cambiaría su momento *total*). Si alguien mide entonces el momento del primer electrón, el momento del segundo electrón podrá ser calculado inmediatamente puesto que la suma de los dos es conocida. Por el contrario, si alguien mide la posición del primer electrón, entonces la posición del segundo electrón podrá ser calculada

---

<sup>41</sup> En realidad, Einstein no participó en la Conferencia Solvay de 1933; semanas antes había partido hacia Estados Unidos para instalarse definitivamente en Princeton. Sin embargo, parece cierto que con anterioridad había expuesto sus ideas durante un seminario de Leon Rosenfeld en Bruselas. Previos ataques de Einstein a la mecánica cuántica se habían producido durante las Conferencias Solvay de 1927 y 1930. (*N. del t.*)

inmediatamente puesto que su separación es conocida. Pero esto quiere decir que al observar el estado del primer electrón podemos cambiar instantáneamente la función de onda de modo que el segundo electrón tenga una posición definida o un momento definido, *incluso aunque nunca nos acerquemos al segundo electrón*. ¿Realmente te sientes feliz pensando que la función de onda es real si puede cambiar de esta forma?

SCROOGE: Puedo aceptarlo. No me preocupa la regla de la relatividad especial que prohíbe enviar señales más rápidas que la velocidad de la luz; no existe conflicto con esta regla. Un físico que mida el momento del segundo electrón no tiene forma de saber si el valor que encuentra ha sido afectado por las observaciones del primer electrón. Todo lo que sabe es que, antes de que lo midiera, el electrón podría tener tanto una posición definida como un momento definido. Ni siquiera Einstein podría utilizar este tipo de medición para enviar señales instantáneas de un electrón a otro. (Ya que estabas en esto, podrías haber mencionado que John Bell ha obtenido consecuencias aún más fantásticas de la mecánica cuántica que involucran los espines atómicos, y los físicos experimentales<sup>42</sup> han demostrado que los espines en sistemas atómicos realmente se comportan de la forma esperada según la mecánica cuántica, pero es que el mundo es precisamente de esta forma). Me parece que nada de esto nos obliga a dejar de pensar en la función de onda como algo real; simplemente se comporta de una forma a la que no estamos acostumbrados, incluyendo cambios

---

<sup>42</sup> Especialmente Alain Aspect.

instantáneos que afectan a la función de onda del universo en su conjunto. Creo que deberías dejar de buscar mensajes filosóficos profundos en la mecánica cuántica, y dejarme seguir utilizándola.

PEQUEÑO TIM: Con el mayor respeto, debo decir que si puedes aceptar cambios instantáneos en la función de onda en todo el espacio, sospecho que puedes aceptar cualquier cosa. En cualquier caso, espero que me perdonarás cuando digo que no estás siendo muy coherente. Has dicho que la función de onda de cualquier sistema evoluciona de una forma perfectamente determinista y que las probabilidades entran en juego sólo cuando hacemos mediciones. Pero, según tu punto de vista, no sólo el electrón, sino también el aparato de medición y el observador humano que lo utiliza constituyen en conjunto un gran sistema descrito mediante una función de onda con un enorme número de valores, todos los cuales evolucionan de forma determinista incluso durante una medición. Así, si todo ocurre de forma determinista, ¿cómo puede haber alguna incertidumbre sobre los resultados de las mediciones? ¿De dónde salen las probabilidades cuando se hacen las mediciones?

Tengo simpatías por ambas partes en este debate, aunque algo más por el realista Scrooge que por el positivista Pequeño Tim. He dado al Pequeño Tim la última palabra porque el problema que él plantea al final ha sido el misterio más importante en la interpretación de la mecánica cuántica. La interpretación ortodoxa de Copenhague que he estado describiendo hasta ahora está basada en una drástica separación entre el sistema físico, gobernado por las reglas de la

mecánica cuántica, y el aparato utilizado para estudiarlo, que se describe clásicamente, es decir, según las reglas de la física precuántica. Nuestra partícula hipotética podría tener una función de onda con ambos valores *aquí* y *allí*, pero, cuando es observada, se convierte de algún modo en definitivamente *aquí* o *allí*, de una manera que es esencialmente impredecible excepto en lo que respecta a las probabilidades. Pero esta diferencia de tratamiento entre el sistema observado y el aparato de medición es seguramente una ficción. Creemos que la mecánica cuántica gobierna cualquier cosa en el universo, no sólo los electrones, átomos y moléculas individuales, sino también los aparatos experimentales y a los físicos que los utilizan. Si la función de onda describe tanto el aparato de medición como el sistema observado, y evoluciona de forma *determinista* según las reglas de la mecánica cuántica, incluso durante una medición, entonces, como pregunta el Pequeño Tim, ¿de dónde salen las probabilidades?

La insatisfacción con la separación artificial entre sistemas y observadores en la interpretación de Copenhague ha llevado a muchos teóricos a adoptar un punto de vista bastante diferente, la interpretación de los *muchos-mundos* o *muchas-historias* de la mecánica cuántica, presentada por primera vez en la tesis doctoral de Hugh Everett en Princeton. Según este enfoque, una medida *aquí-o-allí* de nuestra partícula hipotética consiste en algún tipo de interacción entre la partícula y el aparato de medición tal que la función de onda del sistema combinado termina teniendo valores apreciables para sólo dos configuraciones; un valor corresponde a la

configuración en la que la partícula está *aquí* y el puntero del aparato marca *aquí*; el otro corresponde a la posibilidad de que la partícula esté *allí* y el puntero del aparato marca *allí*. Sigue habiendo una función de onda definida, producida de una forma completamente determinista por la interacción con el aparato de medición gobernado por las reglas de la mecánica cuántica. Sin embargo, los dos valores de la función de onda corresponden a estados de diferente energía y, debido a que el aparato de medición es macroscópico, esta diferencia de energía es muy grande y estos dos valores oscilan con frecuencias muy diferentes. Observar la posición del puntero en el aparato de medición es como sintonizar al azar una de entre dos estaciones de radio,  $K_{AQUI}$  y  $W_{ALLI}$ ; mientras las frecuencias de emisión estén bien separadas no hay interferencia y usted recibe una estación o la otra con probabilidades proporcionales a sus intensidades. La ausencia de interferencia entre los dos valores de la función de onda significa que la historia del mundo se ha desdoblado efectivamente en dos historias separadas, una en la que la partícula está *aquí* y otra en la que la partícula está *allí*, y estas dos historias se mantienen en lo sucesivo desdobladas sin que cada una de ellas interaccione con la otra<sup>43</sup>.

Aplicando las reglas de la mecánica cuántica al sistema combinado de partícula y aparato de medición, es posible demostrar realmente que la probabilidad de encontrar la partícula *aquí* con el puntero del

---

<sup>43</sup> El fenómeno por el que las dos historias del mundo dejan de interferir entre sí se conoce como «decoherencia». El estudio de cómo sucede esto ha atraído recientemente mucha atención por parte de teóricos entre los que se incluyen Murray Gell-Mann y James Hartle, e independientemente Bryce De Witt.

aparato marcando *aquí* es proporcional al cuadrado del valor *aquí* de la función de onda de la partícula inmediatamente antes de que empezara a interactuar con el aparato de medición, tal como precisamente postula la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. Sin embargo, este argumento no responde realmente a la pregunta del Pequeño Tim. Al calcular la probabilidad de que el sistema combinado de partícula y aparato de medición esté en cualquier configuración, estamos haciendo intervenir implícitamente a un observador que mira el puntero y descubre que marca *aquí* o *allí*. Aunque en este análisis el aparato de medición se trataba mecanocuánticamente, el observador era tratado clásicamente: este encuentra que el puntero señala definitivamente *aquí* o *allí*, de una forma que, una vez más, no puede ser predicha excepto en términos de probabilidades. Por supuesto, podríamos tratar al observador mecanocuánticamente, pero sólo al precio de introducir otro observador que detecte las conclusiones del primero, quizá leyendo un artículo en una revista de física. Y así sucesivamente.

Una larga serie de físicos han tratado de purgar los fundamentos de la mecánica cuántica de cualquier enunciado sobre probabilidades o cualquier otro postulado interpretativo que trace una distinción entre sistemas y observadores<sup>xli</sup>. Lo que se necesita es un modelo mecanocuántico con una función de onda que describa no sólo los diversos sistemas bajo estudio, sino también algo que represente a un observador consciente. Con un modelo semejante se trataría de demostrar que, como resultado de *repetidas* interacciones entre el

observador y los sistemas individuales, la función de onda del sistema combinado evoluciona con certeza hasta una función de onda final, en la que el observador se ha convencido de que las probabilidades de las mediciones individuales son las que prescribe la interpretación de Copenhague. No estoy convencido de que este programa haya sido enteramente satisfecho por el momento, pero creo que al final puede serlo. Si es así, entonces el realismo de Scrooge quedaría completamente reivindicado.

Es verdaderamente sorprendente la poca diferencia que todo esto supone. La mayoría de los físicos utilizan todos los días la mecánica cuántica en sus trabajos sin necesidad de preocuparse sobre los problemas fundamentales de su interpretación. Siendo personas prácticas, con muy poco tiempo para dedicar a seguir todas las ideas y los datos en sus propias especialidades y sin tener que preocuparse por este problema fundamental, no se preocupan de esto. Hace un año aproximadamente, mientras Philip Candelas (del departamento de física en Texas) y yo esperábamos un ascensor, nuestra conversación derivó hacia un joven teórico que parecía muy prometedor cuando era estudiante universitario y que luego había desaparecido. Le pregunté a Phil qué era lo que había interferido en la investigación del ex estudiante. Phil hizo un gesto de pesar con su cabeza y dijo: «Trataba de entender la mecánica cuántica».

Tan irrelevante es la filosofía de la mecánica cuántica para su utilización que uno empieza a sospechar que todas las cuestiones profundas sobre el significado de una medición son realmente cuestiones vacías, a las que nos obliga nuestro lenguaje, un



lenguaje que evolucionó en un mundo gobernado muy aproximadamente por la física clásica. Pero admito cierto malestar en trabajar toda mi vida dentro de un marco teórico que nadie entiende completamente. Y realmente necesitamos comprender mejor la mecánica cuántica en cosmología cuántica, la aplicación de la mecánica cuántica al universo entero donde ningún observador externo es siquiera imaginable. El universo es actualmente demasiado grande para que la mecánica cuántica suponga mucha diferencia, pero, según la teoría del *big bang*, hubo una época en el pasado en la que las partículas estaban tan próximas que los efectos cuánticos debieron haber sido importantes. Nadie sabe hoy día siquiera las reglas para aplicar la mecánica cuántica en este contexto.

Un interés aún mayor tiene para mí la cuestión de si la mecánica cuántica es necesariamente *verdadera*. La mecánica cuántica ha tenido un enorme éxito al explicar las propiedades de las partículas, los átomos y las moléculas, de modo que sabemos que es una aproximación muy buena a la verdad. La pregunta entonces es si existe alguna otra teoría lógicamente posible cuyas predicciones son muy parecidas, pero no exactamente las mismas que las de la mecánica cuántica. Es fácil pensar en maneras de hacer cambios muy pequeños en la mayoría de las teorías físicas. Por ejemplo, la ley newtoniana de la gravitación, la que afirma que la fuerza gravitatoria entre dos partículas decrece como el inverso del cuadrado de la distancia, podría modificarse suponiendo que la fuerza decrece con alguna otra potencia de la distancia que esté

próxima pero no sea exactamente igual a la inversa del cuadrado. Para verificar experimentalmente la teoría de Newton tendríamos que comparar las observaciones del Sistema Solar con lo que cabría esperar para una fuerza que decrece con alguna potencia desconocida de la distancia y, de esta manera, poner un límite a la posible diferencia entre dicha potencia y la inversa del cuadrado. Incluso la relatividad general podría ser ligeramente modificada, por ejemplo, incluyendo pequeños términos más complicados en las ecuaciones del campo o introduciendo en la teoría nuevos campos débilmente interactuantes. Es sorprendente que hasta ahora no haya sido posible encontrar una teoría lógicamente consistente que sea próxima a la mecánica cuántica, aunque distinta de la propia mecánica cuántica.

Yo traté de construir una teoría semejante hace algunos años. Mi propósito no era el de proponer seriamente una alternativa a la mecánica cuántica, sino solamente el tener *alguna* teoría cuyas predicciones fueran próximas, pero no exactamente iguales a las de la mecánica cuántica, para servir de contraste que pudiera ser verificado experimentalmente. Con esto estaba tratando de dar a los físicos experimentales una idea del tipo de experimento que podría proporcionar testes cuantitativos interesantes sobre la validez de la mecánica cuántica. Uno quiere verificar la propia teoría cuántica, y no una teoría mecanocuántica particular como el modelo estándar, así que para distinguir experimentalmente entre la mecánica cuántica y sus alternativas uno tiene que verificar alguna característica muy general de cualquier teoría mecanocuántica

posible. Tratando de inventar una alternativa a la mecánica cuántica me centré en la característica general de la mecánica cuántica que siempre había parecido en alguna medida más arbitraria que las otras: su *linealidad*.

En este punto tengo que decir algo sobre el significado de la linealidad. Recordemos que los valores de la función de onda de cualquier sistema cambian a velocidades que dependen tanto de dichos valores como de la naturaleza del sistema y su entorno. Por ejemplo, la velocidad de cambio del valor *aquí* de la función de onda de nuestra partícula hipotética es igual al producto de una constante por el valor *aquí* más el producto de otra constante por el valor *allí*. Una regla dinámica de este tipo se llama lineal, porque, cuando cambiamos un valor de la función de onda en un instante y hacemos una representación gráfica de cualquier valor de la función de onda en cualquier instante posterior frente al valor que ha sido cambiado, entonces, si todas las demás cosas siguen permaneciendo iguales, la gráfica es una línea recta. Hablando de un modo muy general, la respuesta del sistema a cualquier cambio en su estado es proporcional a dicho cambio. Una consecuencia muy importante de esta linealidad es que, como Scrooge señalaba, los sistemas cuánticos no pueden exhibir caos: un pequeño cambio en las condiciones iniciales produce sólo un pequeño cambio en los valores de la función de onda en cualquier instante posterior.

Existen muchos sistemas clásicos que son lineales en este sentido, pero la linealidad en la física clásica nunca es exacta. Por el contrario, se supone que la mecánica cuántica es exactamente

lineal en cualquier circunstancia. Si uno está buscando la forma de cambiar la mecánica cuántica es natural ensayar la posibilidad de que quizá la evolución de la función de onda no sea lineal después de todo.

Con algún trabajo llegué a una alternativa ligeramente no lineal a la mecánica cuántica que parecía tener sentido físico y podría ser verificada fácilmente con una aproximación muy alta contrastando una consecuencia general de la linealidad, el hecho de que las frecuencias de oscilación de cualquier tipo de sistema lineal no dependen de cómo se exciten las oscilaciones. Por ejemplo, Galileo observó que la frecuencia con que oscila un péndulo no depende de la amplitud de la oscilación. Esto se debe a que, mientras la magnitud de las oscilaciones sea suficientemente pequeña, el péndulo es un sistema lineal: las velocidades de cambio de su desplazamiento y de su cantidad de movimiento son proporcionales a su cantidad de movimiento y a su desplazamiento, respectivamente. Todos los relojes se basan en esta característica de las oscilaciones de los sistemas lineales, ya sean relojes de péndulo, de resorte o de cristal de cuarzo. Hace unos pocos años, tras una conversación con David Wineland del National Bureau of Standards, me di cuenta de que los núcleos giratorios que utilizaba el Bureau para establecer patrones de tiempo proporcionaban un maravilloso test de la linealidad de la mecánica cuántica; en mi alternativa ligeramente no lineal a la mecánica cuántica la frecuencia con que precede el eje de rotación del núcleo alrededor de un campo magnético dependería muy débilmente del ángulo entre el eje de

rotación y el campo magnético. El hecho de que semejante efecto no había sido observado en el Bureau of Standards me confirmó inmediatamente que cualquier efecto no lineal en el núcleo estudiado (un isótopo de berilio) no podría contribuir en más de una parte en mil billones de billones a la energía del núcleo. Después de este trabajo, Wineland y otros varios físicos experimentales en Harvard, Princeton y otros laboratorios han mejorado estas mediciones, de modo que ahora sabemos que los efectos no lineales tienen que ser incluso menores que esto. La linealidad de la mecánica cuántica, aunque sólo fuera aproximada, es una bastante buena aproximación después de todo.

Nada de esto resultaba particularmente sorprendente. Incluso si hubiera pequeñas correcciones no lineales a la mecánica cuántica no habría razón para creer que estas correcciones tuvieran que ser lo suficientemente grandes para aparecer en la primera serie de experimentos diseñados para buscarlas. Lo que encontré desalentador es que esta alternativa no lineal a la mecánica cuántica resultaba tener dificultades internas puramente teóricas. Por mi parte, no encontré ninguna forma de extender la versión no lineal de la mecánica cuántica a teorías basadas en la teoría de la relatividad especial de Einstein. Más adelante, después de que mi trabajo saliera publicado, N. Gisin en Ginebra y mi colega Joseph Polchinski en la Universidad de Texas señalaron independientemente que, en el experimento mental de Einstein-Podolsky-Rosen mencionado por el Pequeño Tim, las no linealidades de la teoría generalizada *podrían* ser utilizadas para enviar señales

instantáneamente a grandes distancias, un resultado prohibido por la relatividad especial<sup>44</sup>. Al menos por el momento, yo he abandonado el problema; sencillamente no sé cómo modificar la mecánica cuántica en una pequeña medida sin deshacerla por completo.

Este fracaso teórico en encontrar una alternativa plausible a la mecánica cuántica, más incluso que la precisa verificación experimental de la linealidad, me sugiere que la mecánica cuántica es como es porque cualquier cambio pequeño en la mecánica cuántica llevaría a absurdos lógicos. Si esto es cierto, la mecánica cuántica puede ser una parte permanente de la física. De hecho, es posible que la mecánica cuántica sobreviva no simplemente como una aproximación a una verdad más profunda, del modo en que la teoría de la gravitación de Newton sobrevive como una aproximación a la teoría de la relatividad general de Einstein, sino como una característica exactamente válida de la teoría final.

---

<sup>44</sup> Polchinski encontró después una interpretación ligeramente modificada de su teoría en la que este tipo de comunicación más rápida que la luz estaba prohibida, pero en la que los «diferentes mundos» correspondientes a diferentes resultados de medidas pueden continuar comunicándose entre sí.

## Capítulo 4

### Historias de teoría y experimento

*Al envejecer el mundo se nos vuelve más extraño, más complicada la ordenación de lo muerto y lo vivo. No el intenso momento aislado, sin antes ni después, sino toda una vida ardiendo en cada momento<sup>45</sup>.*

*T. S. ELIOT, East Coker*

Quiero contar ahora tres historias que tratan de avances en la física del siglo XX. Un hecho curioso emerge en estas historias: una y otra vez los físicos se han guiado por su sentido de la belleza, no sólo al desarrollar nuevas teorías sino incluso al juzgar el valor de las teorías físicas una vez que han sido desarrolladas. Parece que ahora estamos aprendiendo a anticipar la belleza de la naturaleza en su nivel más fundamental. Nada podría ser más alentador respecto al hecho de que realmente nos estamos moviendo hacia el descubrimiento de leyes finales de la naturaleza.

Mi primera historia se refiere a la teoría de la relatividad general, la teoría de la gravitación de Einstein. Einstein desarrolló esta teoría

---

<sup>45</sup> [As we grow older / The world becomes stranger, the pattern more complicated / Of dead and living. Not the intense moment / Isolated, with no before and after, / But a lifetime burning in every moment]

en los años 1907-1915 y la dio a conocer en una serie de artículos en 1915-1916. Dicho de forma muy breve, en lugar de la imagen newtoniana de la gravitación como una atracción entre todos los cuerpos masivos, la relatividad general describe la gravitación como un efecto de la curvatura del espacio-tiempo producida por la materia y la energía. A mediados de los años veinte esta teoría revolucionaria había sido aceptada generalmente como la teoría correcta de la gravitación, una posición que ha mantenido desde entonces. ¿Cómo se llegó a ello?

Einstein reconoció inmediatamente en 1915 que su teoría resolvía un viejo conflicto entre las observaciones del Sistema Solar y la teoría newtoniana. Desde 1859 había existido una dificultad para entender la órbita del planeta Mercurio dentro del marco de la teoría newtoniana. Según la mecánica y la teoría de la gravitación de Newton, si no hubiera en el universo nada más que el Sol y un solo planeta, dicho planeta describiría una elipse perfecta alrededor del Sol. La orientación de la elipse (la dirección en la que apuntan sus ejes mayor y menor) nunca cambiaría; sería como si la órbita del planeta estuviera fija en el espacio. Ahora bien, debido a que el Sistema Solar contiene de hecho varios planetas diferentes que perturban ligeramente el campo gravitatorio del Sol, las órbitas elípticas de todos los planetas preceden en realidad; es decir, giran lentamente en el espacio<sup>46</sup>. En el siglo XIX llegó a saberse que la

---

<sup>46</sup> Es decir, las órbitas no se cierran exactamente: un planeta que va desde su punto de máxima aproximación al Sol, conocido como perihelio, hasta el punto de mayor distancia al Sol y luego vuelve de nuevo al punto de máxima aproximación describe un ángulo algo superior a los 360 grados. El pequeño cambio de orientación de la órbita resultante se denomina normalmente precesión del perihelio.



órbita del planeta Mercurio cambia su orientación en un ángulo de alrededor de 575 segundos por siglo. (Un grado es igual a 3600 segundos). Pero la teoría newtoniana predecía que la órbita de Mercurio debía preceder 532 segundos por siglo, una diferencia de 43 segundos por siglo respecto al valor observado. Otra forma de decir esto es que si usted espera 225 000 años, la órbita elíptica volverá a su orientación original después de haber dado una vuelta completa de 360 grados, mientras que la teoría newtoniana predecía que esto llevaría 244 000 años; no era una discrepancia espectacular, pero, en cualquier caso, era una discrepancia que había molestado a los astrónomos durante más de medio siglo. Cuando Einstein, en 1915, dedujo las consecuencias de su nueva teoría descubrió que directamente explicaba el exceso de 43 segundos por siglo en la precesión de la órbita de Mercurio. (Uno de los efectos que contribuye a esta precesión extra en la teoría de Einstein es el campo gravitatorio extra producido por la energía del propio campo gravitatorio. En la teoría de la gravitación de Newton la gravitación es producida sólo por la masa, pero no por la energía, y no hay tal campo gravitatorio extra). Einstein recordaba posteriormente que tras este éxito pasó varios días en los que no cabía en sí de gozo.

Después de la guerra, los astrónomos sometieron la relatividad general a un test experimental adicional, una medición de la desviación de los rayos luminosos por el Sol durante el eclipse de Sol de 1919. Los fotones de un rayo de luz son desviados por los campos gravitatorios en la teoría de Einstein de forma muy parecida

a como un cometa que entra en el Sistema Solar desde una gran distancia es desviado por el campo gravitatorio del Sol, que le hace girar en su torno y lo devuelve al espacio interestelar. Por supuesto, la desviación de la luz es mucho menor que la desviación de un cometa porque la luz viaja a una velocidad mucho mayor, del mismo modo que un cometa rápido se desvía mucho menos que uno lento. Si la relatividad general es correcta la desviación de un rayo de luz que pasara rozando el Sol será de 1,75 segundos, unas 50 milésimas de grado. (Los astrónomos deben aguardar un eclipse para medir esta desviación ya que están buscando una curvatura de los rayos luminosos procedentes de una estrella distante cuando dichos rayos pasan cerca del Sol y, por supuesto, es difícil ver estrellas cerca del Sol a menos que la luz del Sol sea interceptada por la Luna durante un eclipse. Por ello, los astrónomos miden la posición de varias estrellas en la esfera celeste seis meses antes del eclipse, cuando el Sol está en el lado opuesto del cielo; luego, esperan seis meses hasta que ocurra el eclipse y miden cuánto se curvan los rayos luminosos al paso de la estrella cerca del Sol, lo que se refleja en un desplazamiento en la posición aparente de dichas estrellas en el cielo). En 1919 los astrónomos británicos organizaron expediciones para observar un eclipse de Sol, desde una pequeña ciudad en el noreste del Brasil y en una isla del golfo de Guinea. Encontraron que la desviación de los rayos luminosos procedentes de varias estrellas era, dentro de los errores experimentales, la que Einstein había predicho. A partir de entonces la relatividad general se hizo famosa en todo el mundo y se convirtió

en tema de conversación en las reuniones sociales en todas partes. Por lo tanto, ¿no resulta obvio que la relatividad general debía reemplazar a la teoría newtoniana de la gravitación? La relatividad general explicaba una vieja anomalía, el exceso en la precesión de la órbita de Mercurio, y predecía acertadamente un nuevo y sorprendente efecto, la desviación de la luz por el Sol. ¿Qué más se puede pedir?

La anomalía en la órbita de Mercurio y la desviación de la luz fueron por supuesto parte de la historia, y una parte importante. Pero, como todo en la historia de la ciencia (y supongo que en la historia de cualquier otra cosa), la simplicidad de la historia se desvanece cuando la miramos con más detalle.

Consideremos el conflicto entre la teoría de Newton y el movimiento observado de Mercurio. Incluso sin la relatividad general, ¿no mostraba esto claramente que algo estaba equivocado en la teoría de la gravedad de Newton? No necesariamente. Cualquier teoría como la teoría de la gravitación de Newton que tiene un enorme ámbito de aplicación está siempre plagada de anomalías experimentales. No hay teoría que no sea contradicha por algún experimento. La teoría de Newton del Sistema Solar fue contradicha por varias observaciones astronómicas a lo largo de toda su historia. Hacia 1916 estas discrepancias comprendían no sólo la anomalía en la órbita de Mercurio sino también anomalías en el movimiento de los cometas Halley y Encke y en el movimiento de la Luna. Todos éstos mostraban un comportamiento que no ajustaba en la teoría de Newton. Ahora sabemos que la explicación de las anomalías en el

movimiento de los cometas y de la Luna no tenía nada que ver con los fundamentos de la teoría de la gravitación. Los cometas Halley y Encke no se comportan como hubiera sido de esperar a partir de los cálculos utilizando la teoría de Newton porque no se conocía la forma correcta de tener en cuenta en dichos cálculos la presión ejercida por los gases que escapan de los cometas en rotación cuando éstos se calientan al pasar cerca del Sol. Y, análogamente, el movimiento de la Luna es muy complicado porque la Luna es un objeto más bien grande y, por lo tanto, sujeto a todo tipo de complicadas fuerzas de marea. Visto retrospectivamente no resulta sorprendente que surgiesen aparentes discrepancias en la aplicación de la teoría de Newton a estos fenómenos. Análogamente, se hicieron varias sugerencias sobre cómo podría ser explicada la anomalía en el movimiento de Mercurio dentro de la teoría newtoniana. Una posibilidad, que fue considerada seriamente a principios de este siglo, era que pudiera haber algún tipo de materia entre Mercurio y el Sol que diera lugar a una ligera perturbación en el campo gravitatorio del Sol. En un desacuerdo individual entre la teoría y el experimento no hay nada que se levante y agite una bandera diciendo «yo soy una anomalía importante». Un científico que escudriñase críticamente los datos en la última parte del siglo XIX o la primera década del siglo XX no tenía un modo seguro de concluir que había algo importante en cualquiera de estas anomalías del Sistema Solar. Correspondió a la teoría el explicar cuáles eran las observaciones importantes.

Una vez que Einstein hubo calculado en 1915 que la relatividad

general implicaba un exceso en la precesión de la órbita de Mercurio igual al valor observado de 43 segundos por siglo, esto se convirtió por supuesto en una importante evidencia para su teoría. De hecho, como discutiré más tarde, podría haber sido tomado incluso más seriamente de lo que lo fue. Quizá fuera la variedad de otras perturbaciones posibles de la órbita de Mercurio, o quizá fuera un prejuicio contra la validación de teorías mediante datos preexistentes o quizá fuera sólo la guerra; el caso es que el éxito de la explicación de Einstein de la precesión de Mercurio en absoluto tuvo un impacto comparable al del informe de la expedición del eclipse de 1919 que verificó la predicción de Einstein sobre la desviación de la luz por el Sol.

Así pues, volvamos ahora a la desviación de la luz por el Sol. Después de 1919 los astrónomos continuaron verificando las predicciones de Einstein en varios eclipses subsiguientes. Hubo un eclipse en 1922 visible en Australia; uno en 1929 en Sumatra; uno en 1936 en la URSS; y uno en 1949 en Brasil. Algunas de estas observaciones parecían dar un resultado para la desviación de la luz de acuerdo con la teoría de Einstein, pero algunas otras encontraron un resultado que estaba en serio desacuerdo con la predicción de Einstein. Y, si bien la expedición de 1919 había estimado en un 10 por 100 la incertidumbre experimental en la desviación basada en observaciones de docenas de estrellas, y un acuerdo con la teoría de Einstein dentro también de una precisión de un 10 por 100 aproximadamente, varias de las expediciones posteriores encontraron que no podían conseguir la misma

aproximación, incluso habiendo observado muchas más estrellas. Es cierto que el eclipse de 1919 fue inusualmente favorable para este tipo de observación. Sin embargo, me inclino a pensar que los astrónomos de la expedición de 1919 se habían dejado llevar por el entusiasmo hacia la relatividad general al analizar sus datos.

En realidad, algunos científicos de la época tuvieron reservas sobre los datos del eclipse de 1919. En un informe al comité Nobel en 1921, Svante Arrhenius hacía referencia a diversas críticas a los resultados publicados sobre la curvatura de la luz<sup>xlii</sup>.

En cierta ocasión, me encontré en Jerusalén con el anciano profesor Sambursky, que en 1919 había sido colega de Einstein en Berlín. Él me dijo que los astrónomos y los físicos de Berlín habían manifestado su escepticismo sobre la posibilidad de que los astrónomos británicos hubieran conseguido realmente un test tan aproximado de la teoría de Einstein.

De ningún modo estoy sugiriendo que en estas observaciones se hubiera deslizado algún fraude. Usted puede suponer la cantidad de fuentes de error que aparecen por todas partes cuando se mide la desviación de la luz por el Sol. Usted está observando una estrella que aparece en el cielo muy próxima al disco solar cuando el Sol es tapado por la Luna. Usted está comparando la posición de la estrella en placas fotográficas impresionadas con seis meses de diferencia. El telescopio puede haber sido enfocado de forma diferente en las dos observaciones. La propia placa fotográfica puede haberse dilatado o contraído durante este intervalo. Y así sucesivamente. Como en todos los experimentos, son necesarias

todo tipo de correcciones. El astrónomo hace estas correcciones de la mejor manera que puede. Pero, si uno sabe la respuesta, hay una tendencia natural a seguir haciendo estas correcciones sólo hasta que uno tiene la respuesta «correcta», y luego dejar de buscar correcciones adicionales. En realidad, los astrónomos de la expedición de 1919 fueron acusados de sesgo por desechar los datos de una de las placas fotográficas que hubieran estado en conflicto con la predicción de Einstein: un resultado del que culparon a un cambio de foco del telescopio<sup>xliii</sup>. Visto retrospectivamente podemos decir que los astrónomos británicos estaban en lo cierto, pero yo no me habría sorprendido si hubiesen seguido encontrando correcciones hasta que su resultado, con todas estas correcciones, encajase finalmente en la teoría de Einstein.

Se supone generalmente que el verdadero test de una teoría está en la comparación de sus predicciones con los resultados del experimento. Pero, con la ventaja de una mirada retrospectiva, hoy se puede decir que la explicación acertada de Einstein en 1915 de la anomalía previamente medida en la órbita de Mercurio era un test mucho más riguroso de la relatividad general que la verificación de su cálculo de la desviación de la luz por el Sol en las observaciones del eclipse de 1919 o en eclipses posteriores. Es decir, en el caso de la relatividad general, una *retrodicción*, el cálculo de la anomalía ya conocida del movimiento de Mercurio proporcionó de hecho un test más convincente de la teoría que una verdadera *predicción* de un nuevo efecto, la desviación de la luz por los campos gravitatorios<sup>xliv</sup>. Pienso que la gente hace hincapié en la predicción como validación

de teorías científicas porque la actitud clásica de los comentaristas de la ciencia es no confiar en los teóricos. Existe el recelo de que el teórico ajuste su teoría para que en ella encaje cualquier hecho experimental ya conocido y, por esta razón, el que la teoría dé cuenta de estos hechos no se considera un test fiable de la misma.

Pero, aunque Einstein supiera del exceso de la precesión de la órbita de Mercurio ya en 1907, nadie que conozca algo de cómo la teoría de la relatividad general fue desarrollada por Einstein, que siga la lógica de Einstein, podría creer posible que Einstein desarrollara la relatividad general para explicar esta precesión. (Enseguida volveré al curso real del pensamiento de Einstein).

Muchas veces es de una *predicción* acertada de lo que realmente deberíamos desconfiar. En el caso de una predicción cierta, como la predicción de Einstein de la curvatura de la luz por el Sol, es cierto que el teórico no conoce el resultado experimental cuando desarrolla la teoría, pero, por el contrario, el experimentador conoce el resultado teórico cuando hace el experimento. Y eso puede llevar, e históricamente ha llevado, a tantos resultados erróneos como la confianza excesiva en las retrodicciones acertadas. Lo repito: no es que el experimentador falsee sus datos. Por lo que yo sé, nunca ha habido un importante caso de falsificación fraudulenta de datos en la física. Pero los físicos experimentales que conocen el resultado que en teoría tienen que obtener, encontrarán difícil dejar de buscar errores observacionales cuando no obtengan dicho resultado o seguir buscando errores cuando lo obtengan. Es un testimonio de la firmeza de carácter de los experimentadores el hecho de que no



siempre obtienen los resultados que esperan.

Para resumir la historia hasta este punto: hemos visto que la primera evidencia experimental sobre la relatividad general se basaba en una sola retrodicción acertada, la de la anomalía en el movimiento de Mercurio, que probablemente no fue tomada tan en serio como se merecía, además de una predicción de un efecto nuevo, la desviación de la luz por el Sol, cuyo aparente éxito tuvo un impacto enorme, pero que en realidad no era tan concluyente como se supuso generalmente en aquella época y fue mirada con escepticismo al menos por algunos científicos<sup>47</sup>. Sólo después de la

---

<sup>47</sup> Mencionaré que Einstein había propuesto un tercer test de la relatividad general basado en un desplazamiento hacia el rojo de la luz gravitacional predicho por la teoría. Del mismo modo que un proyectil arrojado desde la superficie de la Tierra pierde velocidad a medida que sube y se aleja de la gravedad de la Tierra, así también un rayo de luz emitido desde la superficie de una estrella o planeta pierde energía a medida que llega al espacio exterior. En el caso de la luz, esta pérdida de energía se manifiesta como un incremento de la longitud de onda y, por consiguiente (para la luz visible), en un desplazamiento hacia el extremo rojo del espectro. La relatividad general predice que el incremento relativo de la longitud de onda debe ser de 2,12 partes por millón para la luz que sale de la superficie del Sol. Se propuso examinar el espectro de la luz procedente del Sol para ver si las líneas espectrales estaban desplazadas hacia el rojo en esta cantidad respecto a sus longitudes de onda normales. Este efecto fue buscado por los astrónomos, pero no se encontró al principio, un hecho que parece haber preocupado a algunos físicos. El informe de 1917 del comité Nobel señalaba que las medidas de C. E. St. John en el monte Wilson no habían encontrado el desplazamiento hacia el rojo y concluía: «Parece que la teoría de la relatividad de Einstein, cualesquiera que puedan ser sus méritos en otros aspectos, no merece un Premio Nobel». El informe del comité Nobel en 1919 de nuevo menciona el desplazamiento hacia el rojo como una razón para mantener reservas respecto de la relatividad general. Sin embargo, la mayoría de los físicos de la época (incluyendo al propio Einstein) no parecen haber estado muy interesados en el problema del desplazamiento hacia el rojo. Hoy día podemos ver que las técnicas utilizadas hacia 1920 no podían haber dado una medida aproximada del desplazamiento hacia el rojo gravitatorio del Sol. Por ejemplo, el desplazamiento hacia el rojo gravitatorio predicho de dos partes por millón pudo ser enmascarado por un desplazamiento producido por la convección de los gases emisores de luz en la superficie del Sol (el familiar efecto Doppler) que no tenía nada que ver con la relatividad general. Si estos gases estuvieran subiendo hacia el observador a una velocidad de 600 metros por segundo (una velocidad no imposible en el Sol) el desplazamiento hacia el rojo gravitatorio sería completamente cancelado. Sólo en años recientes el estudio cuidadoso de la luz procedente del borde del disco solar (donde la convección tendría lugar principalmente a ángulos rectos respecto a la línea de visión) ha revelado un desplazamiento hacia el rojo gravitatorio de aproximadamente la magnitud esperada. En realidad, la primera medida exacta del desplazamiento hacia el rojo gravitatorio no utilizó la luz del Sol, sino los rayos gamma (luz de longitud de onda muy corta) a los que se permitía subir o caer simplemente 22,6 metros en la

segunda guerra mundial las nuevas técnicas de radar y radioastronomía condujeron a una mejora importante en la precisión de estos testes experimentales de la relatividad general<sup>xlv</sup>. Ahora podemos decir que las predicciones de la relatividad general sobre la desviación (y también el retraso) de la luz que pasa cerca del Sol, y sobre el movimiento orbital no sólo de Mercurio sino también del asteroide Ícaro y otros cuerpos naturales y artificiales, han sido confirmadas con errores experimentales menores que el 1 por 100. Pero para esto hubo de transcurrir mucho tiempo.

No obstante, a pesar de la debilidad de la primera evidencia experimental en favor de la relatividad general, la teoría de Einstein se convirtió en libro de texto estándar para la teoría de la gravitación en los años veinte, y mantuvo esa posición desde entonces, aunque diversas expediciones para observar eclipses en los años veinte y treinta estaban presentando, cuando menos, evidencia equívoca, sobre la teoría. Recuerdo que cuando estudié la relatividad general en los años cincuenta, antes de que los modernos radares y la radioastronomía empezasen a dar nueva evidencia impresionante a favor de la teoría, yo daba por sentado que la relatividad general era más o menos correcta. Quizá todos nosotros fuéramos igualmente crédulos y predispuestos, pero no creo que ésta sea la explicación real. Creo que la amplia aceptación de la relatividad general se debía en gran parte a los atractivos de la propia teoría; en resumen, a su belleza.

---

torre del Jefferson Physical Laboratory en Harvard. Un experimento realizado en 1960 por R. V. Pound y G. A. Rebka encontró un cambio en la longitud de onda de los rayos gamma en acuerdo con la relatividad general dentro de un 10 por 100 de error experimental, una exactitud mejorada unos pocos años más tarde hasta un 1 por 100.

Al desarrollar la relatividad general, Einstein había seguido una línea de pensamiento que podía ser continuada por la siguiente generación de físicos que se pusieran a estudiar la teoría, y que iba a ejercer sobre ellos las mismas cualidades seductoras que habían atraído a Einstein en primer lugar. Podemos remontar la historia hasta 1905, el *annus mirabilis* de Einstein. Ese año, mientras también estaba trabajando en la teoría cuántica de la luz y en una teoría sobre el movimiento de pequeñas partículas en fluidos<sup>48</sup>, Einstein desarrolló una nueva concepción del espacio y el tiempo, ahora llamada teoría de la relatividad especial. Esta teoría encajaba bien con la teoría aceptada de la electricidad y el magnetismo, la electrodinámica de Maxwell. Un observador que se mueva con velocidad constante observará que los intervalos de espacio y tiempo y los campos electromagnéticos quedan modificados por el movimiento del observador de tal forma que las ecuaciones de Maxwell seguirán siendo válidas a pesar del movimiento (lo que no es sorprendente porque la relatividad especial fue desarrollada en concreto para satisfacer este requisito). Pero la relatividad especial no encajaba en absoluto en la teoría de la gravitación de Newton. Por una parte, en la teoría de Newton, la fuerza gravitatoria entre el Sol y un planeta depende de la distancia entre sus posiciones *en el mismo instante*, pero en la relatividad especial no existe significado absoluto para la simultaneidad: dependiendo de su estado de

---

<sup>48</sup> Esto se conoce como movimiento browniano. Este movimiento está causado por el impacto de las moléculas del líquido que golpean a las partículas. Con la ayuda de la teoría de Einstein del movimiento browniano, las observaciones de este movimiento pudieron ser utilizadas para calcular algunas propiedades de las moléculas, y también ayudaron a convencer a los físicos y a los químicos de la realidad de las moléculas.

movimiento, diferentes observadores discreparán sobre si un suceso ocurre antes o después o al mismo tiempo que otro suceso.

Existían varios modos de parchear la teoría de Newton para que estuviese de acuerdo con la relatividad especial, y Einstein ensayó al menos uno de ellos antes de llegar a la relatividad general<sup>49</sup>. La clave que en 1907 le puso en el camino hacia la relatividad general fue una propiedad familiar y distintiva de la gravitación: la fuerza de la gravedad es proporcional a la masa del cuerpo sobre el que actúa. Einstein reflexionó sobre el hecho de que ésta es precisamente la forma en que las llamadas fuerzas inerciales actúan sobre nosotros cuando nos movemos con una velocidad o dirección no uniformes. Es una fuerza de inercia la que empuja a los pasajeros contra el respaldo de sus asientos cuando un avión acelera para despegar. La fuerza centrífuga que mantiene a la Tierra y le impide caer hacia el Sol es también una fuerza inercial. Todas estas fuerzas inerciales son, como la fuerza gravitatoria, proporcionales a la masa del cuerpo sobre el que actúan. Quienes estamos en la Tierra no sentimos ni el campo gravitatorio del Sol ni la fuerza centrífuga debida al movimiento de la Tierra en torno al Sol porque las dos fuerzas se compensan, pero este equilibrio se rompería si una fuerza fuera proporcional a la masa de los objetos sobre los que actúa y la otra no; algunos objetos podrían entonces caer desde la Tierra hacia el Sol y otros podrían ser arrojados desde la Tierra hacia el espacio interestelar. En general, el hecho de que las fuerzas inerciales y las gravitatorias sean ambas proporcionales a la masa del cuerpo sobre

---

<sup>49</sup> Para los expertos, diré que me estoy refiriendo aquí a la teoría escalar sin masa.

el que actúan y no dependan de otras propiedades del cuerpo hace posible identificar en cualquier punto de cualquier campo gravitatorio un «sistema de referencia en caída libre» en el que no se sienten las fuerzas gravitatorias ni las inerciales debido a que están en un equilibrio perfecto para todos los cuerpos. Cuando sentimos las fuerzas gravitatorias o las inerciales es porque no estamos en un sistema en caída libre. Por ejemplo, los cuerpos en caída libre en la superficie de la Tierra se aceleran hacia el centro de la Tierra a 9,8 metros por segundo cada segundo, y nosotros sentimos una fuerza gravitatoria a menos que estemos acelerados hacia abajo al mismo ritmo. Einstein dio un salto lógico y conjeturó que las fuerzas gravitatorias y las inerciales eran en el fondo lo mismo. Llamó a esto principio de equivalencia de la gravitación y la inercia, o simplemente principio de equivalencia. Según este principio, cualquier campo gravitatorio queda completamente descrito diciendo qué sistema de referencia está en caída libre en cada punto del espacio y el tiempo.

Einstein pasó casi una década a partir de 1907 buscando una herramienta matemática apropiada para estas ideas. Finalmente encontró precisamente lo que necesitaba en una profunda analogía entre el papel de la gravitación en física y el de la curvatura en geometría. El hecho de que la fuerza de gravedad pueda hacerse desaparecer durante un breve instante en una pequeña región en torno a cualquier punto de un campo gravitatorio, mediante la adopción de un apropiado sistema de referencia en caída libre, es equivalente a la propiedad de las superficies curvas que afirma que

podemos construir un mapa que, pese a la curvatura de la superficie, indique correctamente las distancias y las direcciones en la vecindad inmediata de cualquier punto que escojamos. Si la superficie es curva, ningún mapa indicará correctamente las distancias y las direcciones en todas partes; cualquier mapa de una región grande supone un compromiso que distorsiona las distancias y las direcciones de una u otra forma. La familiar proyección de Mercator utilizada en los mapas de la Tierra da una buena idea de las distancias y las direcciones en las proximidades del ecuador, con una Groenlandia dilatada hasta multiplicar muchas veces su tamaño real. De la misma forma, un signo de que se está en un campo gravitatorio es el hecho de que no exista *ningún* sistema de referencia en caída libre en el cual los efectos gravitatorios e inerciales se cancelen en todas partes<sup>50</sup>.

Partiendo de esta analogía entre gravitación y curvatura, Einstein saltó a la conclusión de que la gravitación no es ni más ni menos que un efecto de la curvatura del espacio y del tiempo. Para desarrollar esta idea necesitaba una teoría matemática de los espacios curvos que iba más allá de la geometría familiar de la superficie esférica bidimensional de la Tierra. Einstein fue el físico más grande que ha visto el mundo desde Newton, y sabía tantas matemáticas como la mayoría de los físicos de su época, pero no era

---

<sup>50</sup> Por ejemplo, supongamos que adoptamos un sistema de referencia que a través de todo el espacio se está acelerando en la dirección que va de Texas al centro de la Tierra a 9,8 m por segundo cada segundo. En este sistema de referencia quienes estamos en Texas no sentiríamos un campo gravitatorio, porque éste es el sistema de referencia que está en caída libre en Texas, pero nuestros amigos en Australia experimentarían un campo gravitatorio doble del normal, porque en Australia este sistema de referencia se estaría acelerando alejándose del centro de la Tierra, y no acercándose a él.

un matemático propiamente hablando. Finalmente encontró precisamente lo que necesitaba en una teoría del espacio curvo que había sido desarrollada por Riemann y otros matemáticos del siglo anterior. En su forma final, la teoría de la relatividad general consistía precisamente en una reinterpretación en términos de gravitación de la matemática ya existente de los espacios curvos, junto con una *ecuación del campo* que especificaba la curvatura producida por cualquier cantidad dada de materia y energía. De forma notable, para las pequeñas densidades y bajas velocidades que se dan en el Sistema Solar, la relatividad general daba precisamente los mismos resultados que la teoría de la gravitación de Newton, y las dos teorías se distinguían solamente por minúsculos efectos como la precesión de las órbitas y la desviación de la luz.

Tengo algo más que decir más adelante acerca de la belleza de la teoría de la relatividad general. Por el momento espero haber dicho lo suficiente para que se haga una idea del atractivo de estas nociones. Creo que fue este atractivo intrínseco el que mantuvo la creencia de los físicos en la relatividad general durante las décadas en que la evidencia hallada por sucesivas expediciones para observar eclipses se seguía mostrando tan desalentadora.

Esta impresión queda reforzada cuando contemplamos la recepción de la relatividad general en sus primeros años, *antes* de la expedición del eclipse de 1919. Lo más importante de todo fue la recepción de la relatividad general por el propio Einstein. En una tarjeta postal de fecha 8 de febrero de 1916, tres años antes de la

expedición del eclipse, dirigida a Arnold Sommerfeld, un teórico de más edad, Einstein comentaba: «Usted se convencerá de la relatividad general una vez que la haya estudiado. Por consiguiente, no voy a decir una sola palabra en su defensa». No he podido averiguar hasta qué punto el cálculo acertado de la precesión de la órbita de Mercurio contribuyó a la confianza de Einstein en la relatividad general en 1916, pero, mucho antes de esto, antes de que él hiciese este cálculo, algo le debió haber proporcionado confianza suficiente en las ideas que subyacen en la relatividad general para hacerle seguir trabajando en ella, y esto sólo pudo haber sido el atractivo de las propias ideas.

No deberíamos infravalorar esta temprana confianza. La historia de la ciencia ofrece innumerables ejemplos de científicos que tuvieron buenas ideas que no prosiguieron en aquella época, incluso aunque años más tarde estas ideas condujeran a progresos importantes (con frecuencia obtenidos por otros distintos a quienes las habían propuesto). Es un error común el suponer que los científicos son necesariamente abogados devotos de sus propias ideas. Muy a menudo el científico que concibe por primera vez una idea nueva la somete a una crítica infundada o excesiva porque tendría que trabajar mucho y duro y (lo que es más importante) abandonar otra investigación si tuviese que continuar seriamente esta idea.

El caso es que los físicos *quedaron* impresionados por la relatividad general. Un grupo de iniciados en Alemania y en otros lugares oyeron hablar de la relatividad general y la consideraron prometedora e importante mucho antes de la expedición del eclipse



de 1919. Este grupo incluía no sólo a Sommerfeld en Múnich, Max Born y David Hilbert en Gotinga y Hendrik Lorentz en Leiden, con todos los cuales Einstein había mantenido contacto durante la guerra, sino también a Paul Langevin en Francia y Arthur Eddington en Inglaterra, quien impulsó la expedición del eclipse de 1919. Las nominaciones de Einstein para los premios Nobel a partir de 1916 son instructivas. En 1916, Felix Ehrenhaft le propuso por su teoría del movimiento browniano y por la relatividad especial y general. En 1917, A. Haas le propuso por la relatividad general (citando como evidencia el cálculo correcto de la precesión de la órbita de Mercurio). También en 1917, Emil Warburg propuso a Einstein por varias contribuciones incluyendo la relatividad general. Más propuestas en líneas semejantes se recibieron en 1918. Luego, en 1919, cuatro meses después de la expedición del eclipse, Max Planck, uno de los padres de la física moderna, propuso a Einstein por la relatividad general y comentó que Einstein «dio el primer paso más allá de Newton».

No quiero decir con esto que la comunidad mundial de los físicos estuviera convencida unánimemente y sin reservas de la validez de la relatividad general desde el principio. Por ejemplo, el informe del comité Nobel de 1919 sugería que había que aguardar al eclipse del 29 de mayo antes de llegar a una decisión sobre la relatividad general, e incluso después de 1919, cuando en 1921 se le concedió finalmente a Einstein el premio Nobel, no fue explícitamente por la relatividad especial o general sino «por sus servicios a la física teórica, y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto

fotoeléctrico».

En realidad, no es tan importante precisar en qué momento el 75 o el 90 o el 99 por 100 de los físicos se convencieron de la corrección de la relatividad general. Lo importante para el progreso de la física no es la decisión de que una teoría es verdadera, sino la decisión de que es digna de ser tomada en serio, digna de ser enseñada a los estudiantes de licenciatura, digna de escribir libros sobre ella y, sobre todo, digna de ser incorporada a la propia investigación personal. Desde este punto de vista, aquéllos entre los primeros conversos a la relatividad general (tras el propio Einstein) que resultaron más cruciales fueron los astrónomos británicos, que se llegaron a convencer no ya de que la relatividad general fuera verdadera, sino de que era lo suficientemente plausible y bella para que mereciese la pena dedicar una buena parte de sus propias carreras como investigadores a verificar sus predicciones, y que viajaron a miles de kilómetros de distancia de Gran Bretaña para observar el eclipse de 1919. Pero con anterioridad, antes de que la relatividad general estuviese completa y antes del cálculo correcto de la precesión de la órbita de Mercurio, la belleza de las ideas de Einstein había llevado a Erwin Freundlich, del Observatorio Real de Berlín, a organizar una expedición a Crimea, financiada por Krupp, para observar el eclipse de 1914. (La guerra se anticipó a sus observaciones y Freundlich fue encarcelado en Rusia durante un breve periodo de tiempo por sus esfuerzos).

La recepción de la relatividad general no dependió solamente de los datos experimentales, ni solamente de las cualidades intrínsecas de

la teoría, sino de un entramado de teoría y experimento. He hecho hincapié en el lado teórico de esta historia como contrapeso a una ingenua enfatización del experimento. Hace tiempo que los científicos y los historiadores de la ciencia han abandonado la vieja idea de Francis Bacon de que las hipótesis científicas deberían ser desarrolladas a partir de una observación paciente y sin prejuicios de la naturaleza. Es manifiestamente obvio que Einstein no desarrolló la relatividad general quemándose las cejas con datos astronómicos. De todas formas, aún existe una aceptación muy extendida de la idea de John Stuart Mill de que sólo mediante observación podemos *comprobar* nuestras teorías. Pero, como hemos visto aquí, en la aceptación de la relatividad general los juicios estéticos y los datos experimentales estuvieron inseparablemente ligados.

En cierto sentido hubo desde el principio una gran cantidad de datos experimentales que apoyaban la relatividad general: observaciones de la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol, de la Luna alrededor de la Tierra y todas las demás observaciones detalladas del Sistema Solar, que se remontan a Tycho Brahe, y aún más atrás, y que ya habían sido explicadas por la teoría newtoniana. Esto puede parecer al principio un tipo de evidencia muy peculiar. No sólo estamos citando ahora como evidencia favorable a la relatividad general una retrodicción, un cálculo de los movimientos planetarios que ya habían sido medidos en la época en que la teoría fue desarrollada; ahora estamos hablando de observaciones astronómicas que no sólo habían sido realizadas

antes de que Einstein desarrollase su teoría, sino que también habían sido explicadas por otra teoría, la de Newton. ¿Cómo una predicción acertada o una retrodicción de tales observaciones puede contabilizarse como un triunfo de la relatividad general?

Para comprender esto hay que examinar más de cerca las teorías de Newton y de Einstein. La física newtoniana explicaba prácticamente todos los movimientos observados en el Sistema Solar, pero al precio de introducir un conjunto de hipótesis algo arbitrarias. Por ejemplo, consideremos la ley que dice que la fuerza gravitatoria producida por un cuerpo cualquiera decrece a la inversa del cuadrado de la distancia de dicho cuerpo. En la teoría de Newton no hay nada sobre una ley de la inversa del cuadrado que sea particularmente imperativo. Newton desarrolló la idea de una ley de la inversa del cuadrado para explicar hechos conocidos sobre el Sistema Solar, como la relación de Kepler entre el tamaño de las órbitas planetarias y el tiempo que necesitan los planetas para recorrerlas. Aparte de estos hechos observables, en la teoría de Newton uno podría haber reemplazado la ley de la inversa del cuadrado por una ley de la inversa del cubo o una ley de la inversa de la potencia 2,01 sin que esto supusiera el más mínimo cambio en el marco conceptual de la teoría<sup>51</sup>. Sería cambiar un detalle menor

---

<sup>51</sup> Esto es cierto para la formulación que hizo Newton de su teoría en términos de una fuerza que actúa a distancia, pero no para las posteriores reformulaciones de la teoría de Newton (por Laplace y otros) como una teoría de campos. Pero, incluso en la versión de la teoría de campos de la teoría de Newton, sería fácil añadir un nuevo término a las ecuaciones de campo que produjera otros cambios en la dependencia de la fuerza con la distancia. En particular, la ley de la inversa del cuadrado podría reemplazarse por una fórmula que diera a la fuerza gravitatoria un comportamiento aproximadamente como el cuadrado de la distancia hasta una cierta distancia, más allá de la cual la fuerza caería con rapidez exponencial. Este tipo de modificación no es posible en la relatividad general.

en la teoría. La teoría de Einstein era mucho menos arbitraria, mucho más rígida. Para cuerpos que se mueven lentamente en campos gravitatorios débiles, para los que podemos hablar legítimamente de una fuerza gravitatoria ordinaria, la relatividad general *exige* que la fuerza debe decrecer de acuerdo a una ley de la inversa del cuadrado. No es posible en relatividad general ajustar la teoría para obtener cualquier cosa que no sea una ley de la inversa del cuadrado sin violentar las hipótesis subyacentes en la teoría.

Asimismo, como Einstein hizo notar especialmente en sus escritos, el hecho de que la fuerza de la gravedad sobre un objeto pequeño sea proporcional a la masa del objeto y no dependa de ninguna otra propiedad del objeto aparece bastante arbitrario en la teoría de Newton. La fuerza gravitatoria en la teoría de Newton podría haber dependido por ejemplo del tamaño, la forma o la composición química del cuerpo sin alterar las bases conceptuales subyacentes en la teoría. En la teoría de Einstein la fuerza que ejerce la gravedad sobre cualquier objeto *debe* ser proporcional a la masa del objeto e independiente de cualquier otra propiedad<sup>52</sup>; si no fuese así, las fuerzas gravitatorias y las inerciales se compensarían de diferente forma en diferentes cuerpos, y no sería posible hablar de un sistema de referencia en caída libre en el que ningún cuerpo siente los efectos de la gravitación. Esto descartaría la interpretación de la gravitación como un efecto geométrico de la curvatura del espacio-tiempo. Así, una vez más, la teoría de Einstein tiene una rigidez de

---

<sup>52</sup> Estrictamente hablando, esto es válido sólo para objetos pequeños que se mueven lentamente. Para un objeto que se mueve rápidamente la fuerza depende también del momento del objeto. Ésta es la razón por la que el campo gravitatorio del Sol puede desviar los rayos de luz, los cuales tienen momento, pero no masa.

la que carece la teoría de Newton, y por esta razón Einstein pudo sentir que había explicado los movimientos ordinarios del Sistema Solar de un modo que no lo había hecho Newton.

Por desgracia, esta noción de la rigidez de las teorías físicas es muy difícil de establecer de forma precisa. Tanto Newton como Einstein conocían las características generales del movimiento planetario antes de formular sus teorías, y Einstein sabía que necesitaba algo parecido a una ley de la inversa del cuadrado para la fuerza gravitatoria para que su teoría reprodujese los éxitos de la de Newton. También sabía que tenía que terminar con una fuerza gravitatoria proporcional a la masa. Sólo a la luz de este hecho, considerando la teoría global como finalmente quedó desarrollada, es cuando podemos decir que la teoría de Einstein explicaba la ley del inverso del cuadrado o la proporcionalidad de la fuerza gravitatoria respecto a la masa, pero este juicio es una cuestión de gusto e intuición; es simplemente un juicio de valor el estimar que sería demasiado duro asumir una modificación de la teoría de Einstein para permitir una alternativa a la ley del inverso del cuadrado o una no proporcionalidad de la fuerza gravitatoria con la masa. De este modo, desembocamos otra vez en nuestros juicios estéticos y nuestra herencia global de la teoría cuando juzgamos las implicaciones de los datos.

Mi siguiente historia trata de la electrodinámica cuántica: la teoría mecanocuántica de los electrones y la luz. En cierto modo es la imagen especular de la primera historia. Durante cuarenta años la

relatividad general fue ampliamente aceptada como la teoría correcta de la gravitación, pese a la magra evidencia en su favor, porque la teoría era irresistiblemente bella. Por el contrario, la electrodinámica cuántica recibió muy pronto el apoyo de una gran riqueza de datos experimentales, pero aun así fue mirada con desconfianza durante veinte años debido a una contradicción teórica interna que parecía que sólo podría resolverse de malas maneras.

La mecánica cuántica fue aplicada a los campos eléctricos y magnéticos en uno de los primeros artículos sobre mecánica cuántica, el *Dreimännerarbeit*<sup>53</sup> de Max Born, Werner Heisenberg y Pascual Jordan en 1926. Éstos fueron capaces de calcular que la energía y el momento de los campos eléctrico y magnético en un rayo de luz viene en grumos que se comportan como partículas, y así pudieron justificar la introducción por Einstein en 1905 de las partículas de luz conocidas como fotones<sup>54</sup>. El otro ingrediente principal de la electrodinámica cuántica fue aportado por Paul Dirac en 1928. En su forma original, la teoría de Dirac mostraba cómo se podrían hacer las descripciones mecanocuánticas en términos de funciones de onda compatibles con la teoría de la relatividad especial. Una de las consecuencias más importantes de la teoría de Dirac era que para cada tipo de partícula cargada, tal como el

---

<sup>53</sup> Literalmente, *el trabajo de los tres hombres*. En aquella época no eran muy frecuentes los artículos firmados por más de dos personas. (*N., del t.*)

<sup>54</sup> Born, Heisenberg y Jordan consideraron de hecho sólo una versión simplificada de un campo electromagnético, en el que las complicaciones resultantes de la polarización de la luz se ignoraban. Estas complicaciones fueron consideradas un poco más tarde por Dirac; y, más adelante, Enrico Fermi dio un tratamiento completo de la teoría cuántica de campo del electromagnetismo.

electrón, debe haber otro tipo con la misma masa pero con carga eléctrica opuesta, conocido como su antipartícula. La antipartícula del electrón fue descubierta en 1932 y hoy día se conoce como el positrón. La electrodinámica cuántica fue utilizada a finales de los años veinte y principios de los treinta para calcular una amplia variedad de procesos físicos (tales como la dispersión de un fotón que colisiona con un electrón, la dispersión de un electrón por otro y la aniquilación o producción de un electrón y un positrón) con resultados que generalmente estaban en excelente acuerdo con el experimento.

No obstante, a mediados de los años treinta, había llegado a ser un hecho aceptado el que la electrodinámica cuántica no debía ser tomada seriamente excepto como una aproximación válida sólo para reacciones que involucraban fotones, electrones y positrones de energías suficientemente bajas. El problema no era del tipo de los que normalmente aparecen en las historias populares de la ciencia, un conflicto entre expectativas teóricas y datos experimentales, sino más bien una persistente contradicción interna dentro de la propia teoría física. Se trataba del problema de los infinitos.

Formas diversas de este problema ya habían sido señaladas por Heisenberg y Pauli y por el físico sueco Ivar Waller, pero apareció de forma más clara y perturbadora en un artículo de 1930 del joven teórico norteamericano Julius Robert Oppenheimer. Oppenheimer estaba tratando de utilizar la electrodinámica cuántica para calcular un efecto sutil en las energías de los átomos. Un electrón en un átomo podría emitir una partícula de luz, un fotón, continuar en su



órbita durante un breve intervalo, y luego reabsorber el fotón, como un *quarterback* de *rugby* norteamericano que atrapa su propio pase hacia adelante. El fotón nunca sale del átomo y su presencia sólo se manifiesta indirectamente a través de sus efectos en las propiedades del átomo tales como su energía y su campo magnético. (Dichos fotones se denominan *virtuales*). Según las reglas de la electrodinámica cuántica, este proceso produce un desplazamiento en la energía del estado atómico que podría ser calculado sumando un número infinito de contribuciones, una contribución por cada valor posible de la energía que pueda tomar un fotón virtual, sin límite alguno para la energía del fotón<sup>55</sup>. Oppenheimer encontró en su cálculo que, puesto que la suma incluye contribuciones de fotones de energía ilimitadamente alta, esta suma resulta ser infinita, conduciendo a un desplazamiento infinito en la energía del átomo<sup>56</sup>. Alta energía corresponde a pequeñas longitudes de onda; puesto que la luz ultravioleta tiene una longitud de onda más corta que la de la luz visible, este infinito se llegó a conocer como la catástrofe ultravioleta.

Durante los años treinta y principios de los cuarenta hubo consenso entre los físicos en que la aparición de la catástrofe ultravioleta en el cálculo de Oppenheimer y otros cálculos similares demostraba sencillamente que la teoría existente de los electrones y los fotones no podía ser cierta para partículas con energías superiores a unos

---

<sup>55</sup> Las energías permitidas del fotón forman un continuo, de modo que esta «suma» es en realidad una integral.

<sup>56</sup> No toda suma de un número infinito de términos es infinita. Por ejemplo, aunque la suma de  $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots$  es infinita, la suma de  $1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + \dots$  resulta tener el valor perfectamente finito 2.

pocos millones de voltios. El propio Oppenheimer fue el primero en proponer esta idea. Esto se debía en parte a que Oppenheimer era un líder en el estudio de los rayos cósmicos, las partículas de alta energía que penetran en la atmósfera terrestre procedentes del espacio exterior, y su estudio de cómo interaccionan estas partículas de los rayos cósmicos con la atmósfera indicaba que algo extraño estaba pasando con las partículas de alta energía. De hecho, estaba pasando algo extraño, pero no tenía nada que ver con ningún fracaso de la teoría cuántica de los electrones y los fotones; más bien era un signo de la producción de un nuevo tipo de partículas, las partículas que hoy se denominan muones. Pero incluso después de que todo esto fuera clarificado por el descubrimiento de los muones en 1937, seguía siendo una opinión convencional el que algo no marchaba cuando la electrodinámica cuántica se aplicaba a electrones y fotones de alta energía.

El problema de los infinitos podría haber sido resuelto por la fuerza, decretando sencillamente que los electrones sólo pueden emitir y absorber fotones con energías por debajo de un cierto valor límite. Todos los éxitos acumulados por la dinámica cuántica en los años treinta al explicar las interacciones de electrones y fotones involucraban fotones de baja energía, de modo que estos éxitos podrían ser preservados suponiendo que este valor límite de las energías de los fotones fuese suficientemente alto, por ejemplo 10 millones de voltios. Con un límite así para las energías de los fotones virtuales, la electrodinámica cuántica predeciría un desplazamiento muy pequeño de la energía de los átomos. Nadie en

aquel tiempo había medido las energías de los átomos con suficiente precisión para decir si este minúsculo desplazamiento de energía estaba o no realmente presente, de modo que no era cuestión de discrepancia con el experimento. (De hecho, la electrodinámica cuántica fue considerada con tal pesimismo que nadie trató de calcular exactamente cuál debería ser este desplazamiento de la energía). Lo malo de esta solución al problema de los infinitos no es que estuviera en conflicto con los experimentos, sino que era demasiado arbitraria y fea.

En la literatura física de los años treinta y cuarenta se puede encontrar un montón de otras posibles soluciones difíciles de aceptar al problema de los infinitos, incluyendo incluso teorías en las que el infinito causado por la emisión y reabsorción de fotones de alta energía queda cancelado por otros procesos de probabilidad negativa. Por supuesto, el concepto de probabilidad negativa es absurdo; su introducción en la física da una medida de la desesperación que despertaba el problema de los infinitos.

Finalmente, la solución al problema de los infinitos que surgió a finales de los años cuarenta fue mucho más natural y menos revolucionaria<sup>xlvi</sup>. El problema alcanzó su punto culminante a comienzos de junio de 1947 durante una conferencia en el Ram's Head Inn en Shelter Island, en la costa de Long Island. La conferencia había sido organizada para reunir a los físicos que estaban dispuestos, pasados los años de la guerra, a empezar a considerar de nuevo los problemas fundamentales de la física. Resultó ser la conferencia de física más importante desde la

Conferencia Solvay en Bruselas en la que Einstein y Bohr habían discutido sobre el futuro de la mecánica cuántica, quince años antes.

Entre los físicos presentes en Shelter Island estaba Willis Lamb, un joven físico de la Universidad de Columbia. Utilizando la tecnología de detección de microondas desarrollada durante la guerra, Lamb acababa de medir con éxito precisamente el tipo de efecto que Oppenheimer había tratado de calcular en 1930, un desplazamiento en la energía del átomo de hidrógeno debido a la emisión y reabsorción de fotones<sup>57</sup>. Desde entonces este desplazamiento se conoce como desplazamiento Lamb. Por sí misma, esta medida no resolvía el problema de los infinitos, pero obligó a los físicos a enfrentarse de nuevo con este problema para dar cuenta del valor medido del desplazamiento Lamb. La solución que encontraron iba a marcar el curso posterior de la física.

Varios de los teóricos presente en la Conferencia de Shelter Island ya habían oído hablar del resultado de Lamb, y habían ido a la reunión armados con una idea sobre la posibilidad de calcular el desplazamiento Lamb utilizando los principios de la electrodinámica cuántica pese al problema de los infinitos. Argumentaban que el desplazamiento en la energía de un átomo debido a la emisión y reabsorción de fotones no es realmente un observable; el único observable es la energía total del átomo, que se calcula añadiendo

---

<sup>57</sup> Estrictamente hablando, Lamb midió la diferencia entre los desplazamientos de energía de dos estados del átomo de hidrógeno que, según la antigua teoría de Dirac, en ausencia de emisiones y reabsorciones de fotones tendrían la misma energía. Aunque Lamb no pudo medir las energías exactas de estos dos estados atómicos, podía detectar que sus energías diferían en realidad en una cantidad minúscula, demostrando así que algo había desplazado las energías de los dos estados en cantidades diferentes.

este desplazamiento de energía a la energía calculada en 1928 por Dirac. Esta energía total depende de la *masa desnuda* y la *carga desnuda* del electrón, la masa y la carga que aparecen en las ecuaciones de la teoría antes que empecemos a preocuparnos por la emisión y reabsorción de fotones. Pero los electrones libres, al igual que los electrones en los átomos, siempre están emitiendo y reabsorbiendo fotones que afectan a la masa y a la carga eléctrica del electrón y, por consiguiente, la masa y la carga desnudas no son las mismas que la masa y la carga medidas del electrón que aparecen en las tablas de partículas elementales. De hecho, para dar cuenta de los valores observados (que, por supuesto, son finitos) de la masa y la carga del electrón, la masa y la carga desnudas deben ser infinitas. La energía total del átomo es así la suma de dos términos, ambos infinitos: la energía desnuda, que es infinita porque depende de la masa y la carga desnudas infinitas, y el desplazamiento de la energía calculado por Oppenheimer, que es infinito porque recibe contribuciones de fotones virtuales de energía ilimitada. Esto planteaba una pregunta: ¿es posible que estos dos infinitos se cancelen y den lugar a una energía total finita<sup>58</sup>?

A primera vista, la respuesta parecía ser un no descorazonador. Pero Oppenheimer había dejado algo fuera de su cálculo. El desplazamiento de la energía recibe contribuciones no sólo de procesos en los que un electrón recibe y más tarde reabsorbe un fotón, sino también de procesos en los que un positrón, un fotón y un segundo electrón surgen espontáneamente del espacio vacío

---

<sup>58</sup> Esta idea había sido sugerida algún tiempo antes por Dirac, por Weisskopf, y por H. A. Kramers.

para que, a continuación, el fotón sea absorbido en la aniquilación del positrón y del electrón original. De hecho, este extraño proceso *debe* ser incluido en el cálculo para que la respuesta final a la energía del átomo dependa de la velocidad del átomo en la forma dictada por la teoría de la relatividad especial. (Esto es un ejemplo del resultado, encontrado mucho antes por Dirac, según el cual una teoría mecanocuántica del electrón es compatible con la relatividad especial sólo si la teoría incluye también al positrón, la antipartícula del electrón). Uno de los teóricos presentes en Shelter Island era Victor Weisskopf, que ya en 1936 había calculado el desplazamiento de la energía resultante de este proceso positrónico hallando que aproximadamente cancela el infinito encontrado por Oppenheimer<sup>59</sup>. No era demasiado difícil conjeturar que, si se tiene en cuenta el proceso positrónico y se tiene en cuenta la diferencia entre la masa y la carga desnudas del electrón y sus valores observados, entonces los infinitos en los desplazamientos de la energía se cancelarían globalmente.

Aunque Oppenheimer y Weisskopf estaban presentes en la reunión de Shelter Island, el teórico que calculó por primera vez el desplazamiento Lamb fue Hans Bethe, ya famoso por su trabajo en física nuclear que incluía la descripción, en los años treinta, de las cadenas de reacciones nucleares que dan lugar al brillo de las estrellas. Basándose en las ideas que habían estado circulando en Shelter Island, Bethe llevó a cabo, en el viaje en tren de regreso de

---

<sup>59</sup> Para ser más concretos, la inclusión de este proceso positrónico hacía que la suma sobre las energías se comportara como la serie  $1 + 1/2 + 1/3 + \dots$  en lugar de  $1 + 2 + 3 + 4 \dots$ . Ambas sumas son infinitas, pero una es menos infinita que la otra, en el sentido de que requiere menos esfuerzo el imaginar qué hay que hacer con ella.

la conferencia, un cálculo aproximado del desplazamiento de la energía que Lamb había medido. Él no disponía todavía de técnicas realmente efectivas para incluir los positrones y otros efectos de la relatividad especial en este tipo de cálculo y su trabajo en el tren siguió muy de cerca los esfuerzos de Oppenheimer, diecisiete años antes. La diferencia consistía en que, cuando Bethe encontraba un infinito, desechaba las contribuciones al desplazamiento de la energía procedentes de la emisión y absorción de fotones de alta energía (de forma algo arbitraria, Bethe tomó el límite de las energías de los fotones igual a la energía de la masa del electrón), y de este modo obtuvo un resultado finito en pleno acuerdo con la medida de Lamb. Era casi el cálculo que Oppenheimer podría haber hecho en 1930, pero se necesitó el apremio de un experimento que precisaba ser explicado y el valor de las ideas que estaban en el aire en Shelter Island para que alguien llevase un poco más lejos el cálculo hasta completarlo.

No pasó mucho tiempo antes de que los físicos hiciesen cálculos más precisos del desplazamiento Lamb que incluían positrones y otros efectos relativistas<sup>60</sup>. La importancia de estos cálculos residía no tanto en que daban un resultado más aproximado, sino en que el problema de los infinitos había sido domesticado: los infinitos se cancelaban sin necesidad de desechar arbitrariamente las contribuciones de los fotones virtuales de alta energía.

Como dijo Nietzsche, «lo que no me mata, me hace más fuerte<sup>xlvii</sup>». El problema de los infinitos había estado a punto de matar a la

---

<sup>60</sup> Estos cálculos fueron realizados por el propio Lamb con Norman Kroll, y por Weisskopf con J. B. French.

electrodinámica cuántica, pero ésta fue salvada por la idea de cancelar los infinitos en una redefinición o *renormalización* de la masa y la carga del electrón. Pero, para que el problema de los infinitos sea resuelto de esta manera, es necesario que los infinitos aparezcan en los cálculos sólo en ciertas formas muy limitadas, lo que sólo ocurre en una limitada clase de teorías cuánticas de campos especialmente simples. Tales teorías se denominan *renormalizables*. La versión más simple de la electrodinámica cuántica es renormalizable en este sentido, pero cualquier cambio pequeño en esta teoría acabaría con esta propiedad y conduciría a una teoría con infinitos que no podrían ser cancelados mediante una redefinición de las constantes de la teoría. Así, esta teoría no sólo era matemáticamente satisfactoria y estaba en acuerdo con el experimento, sino que parecía contener dentro de sí una explicación de por qué era como era; cualquier pequeño cambio en la teoría llevaría no sólo a un desacuerdo con el experimento sino a resultados totalmente absurdos: respuestas infinitas a preguntas perfectamente razonables.

Los cálculos del desplazamiento Lamb de 1948 eran todavía terriblemente complicados porque, aunque estos cálculos incluían ahora positrones, daban el desplazamiento Lamb como una suma de términos que individualmente violaban la teoría de la relatividad especial y sólo la respuesta final era compatible con la teoría de la relatividad. Mientras, Richard Feynman, Julian Schwinger y Sin-itiro Tomonaga estaban desarrollando, independientemente, métodos de cálculo mucho más simples y compatibles con la teoría



de la relatividad en todos sus pasos. Ellos utilizaron estas técnicas para hacer otros cálculos, algunos de éstos en espectacular acuerdo con el experimento. Por ejemplo, el electrón tiene un pequeñísimo campo magnético, originalmente calculado en 1928 por Dirac basándose en su teoría cuántica relativista del electrón. Poco después de la conferencia de Shelter Island, Schwinger publicó los resultados de un cálculo aproximado del desplazamiento en la intensidad del campo magnético del electrón debido a procesos en los que se emiten y reabsorben fotones virtuales. Este cálculo ha sido refinado continuamente desde entonces, hasta llegar al moderno resultado de que el campo magnético del electrón se incrementa, a causa de emisiones y reabsorciones de fotones y efectos similares, en un factor 1,00115965214 (con una incertidumbre de alrededor de 3 en la última cifra decimal) por encima de la vieja predicción de Dirac, en la que estas emisiones y reabsorciones de fotones habían sido ignoradas<sup>xlvi</sup>. Casi al mismo tiempo que Schwinger estaba haciendo su cálculo, los experimentos de I. I. Rabi y su grupo en Columbia estaban mostrando que el campo magnético del electrón es realmente un poco mayor que el viejo valor de Dirac, y precisamente en la cantidad calculada por Schwinger. Un resultado experimental reciente da que el campo magnético del electrón es mayor que el valor de Dirac en un factor 1,001159652188 con una imprecisión de alrededor de 4 en la última cifra decimal. El acuerdo numérico entre teoría y experimento en este caso es quizá el más impresionante de toda la ciencia.

Después de tales éxitos no es sorprendente que la electrodinámica cuántica, en su versión renormalizable simple, haya llegado a ser aceptada generalmente como la teoría correcta de los electrones y de los fotones. Sin embargo, a pesar del éxito experimental de la teoría, e incluso a pesar de que los infinitos en esta teoría se cancelan cuando se les trata correctamente, el hecho mismo de que los infinitos ocurran continúa dando lugar a críticas a la electrodinámica cuántica y teorías similares. En particular, Dirac siempre decía que la renormalización barría los infinitos bajo la alfombra. Yo discrepaba de Dirac y discutí este punto con él en las conferencias de Coral Gables y del lago Constanza. Tener en cuenta la diferencia entre la carga y la masa desnudas del electrón y sus valores medidos no es simplemente un truco inventado para deshacerse de los infinitos: es algo que hubiéramos tenido que hacer incluso si todo fuera finito. Nada hay arbitrario o *ad hoc* en este procedimiento; es simplemente una cuestión de identificar correctamente lo que realmente estamos midiendo en nuestras mediciones de la masa y la carga del electrón en el laboratorio. No veía qué había de terrible en un infinito en la masa y la carga desnudas siempre que las respuestas finales a las cuestiones físicas resultasen ser finitas e inambiguas y en acuerdo con el experimento<sup>61</sup>. Me parecía que una teoría que tiene un éxito tan

---

<sup>61</sup> Existe un problema más serio con la electrodinámica cuántica. En 1954 Murray Gell-Mann y Francis Low demostraron que la carga efectiva del electrón aumenta ligeramente con la energía del proceso en el que es medida, y ellos plantearon la posibilidad de que (como ya había sido conjeturado antes por el físico soviético Lev Landau) el cambio efectivo se hacía en la práctica infinito a alguna energía muy alta. Cálculos más recientes han indicado que este desastre ocurre en la electrodinámica cuántica pura, la teoría de fotones y electrones exclusivamente. Sin embargo, la energía a la que este infinito ocurre es tan alta (mucho mayor que la contenida

espectacular como la electrodinámica cuántica tiene que ser más o menos correcta, aunque quizá no la estemos formulando de la manera idónea. Pero Dirac no quedó convencido por estos argumentos. Yo no estoy de acuerdo con su actitud hacia la electrodinámica cuántica, pero no creo que se tratase simplemente de obstinación por su parte; la demanda de una teoría completamente finita es similar a muchos otros juicios estéticos que siempre necesitan hacer los físicos teóricos.

Mi tercera historia trata del desarrollo y aceptación final de la teoría moderna de la fuerza nuclear débil. Esta fuerza no es tan importante en la vida cotidiana como las fuerzas eléctricas, magnéticas o gravitatorias, pero juega un papel esencial en las cadenas de reacciones nucleares que generan energía y producen los diversos elementos químicos en los núcleos de las estrellas.

La fuerza nuclear débil quedó de manifiesto por primera vez en el descubrimiento de la radiactividad por Henri Becquerel en 1896. En los años treinta se llegó a conocer que en el tipo particular de radiactividad que había descubierto Becquerel, conocida como desintegración beta, la fuerza nuclear débil provoca que un neutrón en el interior del núcleo se convierta en un protón y, al mismo tiempo, se creen un electrón y otra partícula, hoy día conocida como antineutrino, que son expulsadas del núcleo. Esto es algo que no

---

en la masa total del universo observable) que mucho antes de que tales energías sean alcanzadas resulta imposible ignorar todos los otros tipos de partículas en la naturaleza distintos de los fotones y los electrones. Mientras sigue existiendo un problema de consistencia matemática de la electrodinámica cuántica, dicho problema se ha mezclado con el problema de la consistencia de nuestras teorías cuánticas de todas las partículas y fuerzas.

está permitido mediante ningún otro tipo de fuerza. La fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos a los protones y los neutrones en el núcleo, y la fuerza electromagnética, que trata de repeler a los protones en el núcleo, no cambian las identidades de dichas partículas, y la fuerza gravitatoria ciertamente no hace nada parecido, de modo que la observación de neutrones que se mudan en protones o de protones que se mudan en neutrones proporciona evidencia de un tipo nuevo de fuerza en la naturaleza. Como indica su nombre, la fuerza nuclear débil es más débil que la fuerza electromagnética o la fuerza nuclear fuerte. Esto queda de manifiesto, por ejemplo, en el hecho de que la desintegración nuclear beta es muy lenta; la desintegración nuclear beta más rápida necesita en promedio alrededor de 1 centésima de segundo, lánguidamente lenta comparada con la típica escala de tiempo de los procesos causados por la fuerza nuclear fuerte, que es aproximadamente de una millonésima de millonésima de millonésima de millonésima de segundo.

En 1933 Enrico Fermi dio el primer paso significativo hacia una teoría de esta nueva fuerza. En su teoría, la fuerza nuclear débil no actúa a distancia como las fuerzas gravitatorias, eléctricas o magnéticas; más bien, convierte un neutrón en un protón y crea un electrón y un antineutrino instantáneamente, todo ello en el mismo punto del espacio. A esto siguió un cuarto de siglo de esfuerzos experimentales dirigidos a atar los cabos sueltos de la teoría de Fermi. El principal de estos cabos sueltos era la cuestión de cómo depende la fuerza débil de la orientación relativa de los espines de

las partículas que intervienen en el proceso. En 1957 esto quedó establecido y la teoría de Fermi de la fuerza nuclear débil fue llevada a su forma final<sup>62</sup>.

Tras este gran avance en 1957 se podría decir que no existían anomalías en nuestra comprensión de la fuerza nuclear débil. No obstante, aunque disponíamos de una teoría que era capaz de dar cuenta de todo lo que se conocía experimentalmente sobre la fuerza débil, los físicos en general encontraban la teoría muy insatisfactoria, y muchos de nosotros trabajábamos duramente tratando de depurar la teoría y hacer que tuviera un sentido.

Las cosas que no iban bien en la teoría de Fermi no eran experimentales sino teóricas. En primer lugar, aunque la teoría funcionaba bien para las desintegraciones beta de los núcleos, cuando la teoría se aplicaba a procesos más exóticos daba resultados absurdos. Los teóricos podían plantear preguntas perfectamente razonables, como cuál es la probabilidad de dispersión de un neutrino por un antineutrino con el que colisiona, y cuando hacían el cálculo (teniendo en cuenta la emisión y reabsorción de un neutrón y un antiprotón) la respuesta resultaba ser infinita. Como ustedes comprenderán, no se estaban llevando a cabo experimentos de este tipo, pero los cálculos daban resultados que difícilmente podrían estar de acuerdo con ningún resultado experimental. Como hemos visto, infinitos similares habían sido encontrados en la teoría de las fuerzas electromagnéticas por Oppenheimer y otros a principios de los años treinta, pero, a finales

---

<sup>62</sup> Por Feynman y Gell-Mann e, independientemente, por Robert Marshak y George Sudarshan.

de los años cuarenta, los teóricos habían descubierto que todos estos infinitos de la electrodinámica cuántica se cancelarían cuando las masas y cargas de los electrones fueran definidas apropiadamente, o «renormalizadas». Y cuanto más se sabía sobre las fuerzas débiles, se iba haciendo más evidente que los infinitos de la teoría de Fermi de las fuerzas débiles no se cancelarían del mismo modo; la teoría no era renormalizable.

La otra cosa que no iba bien en la teoría de las fuerzas débiles era que incluía un gran número de elementos arbitrarios. La forma básica de la fuerza débil había sido inferida de manera más o menos directa a partir de los experimentos y podría haber sido bastante diferente sin violar ningún principio físico conocido.

Desde que terminé mis estudios, yo había trabajado de forma intermitente sobre la teoría de las fuerzas débiles, pero en el año 1967 estaba trabajando sobre las fuerzas nucleares fuertes, las fuerzas que mantienen unidos a los neutrones y los protones en el interior de los núcleos atómicos. Estaba tratando de desarrollar una teoría de las fuerzas fuertes basada en una analogía con la electrodinámica cuántica<sup>63</sup>. Pensaba que la diferencia entre las fuerzas nucleares fuertes y el electromagnetismo podría explicarse por un fenómeno conocido como *ruptura de simetría*, que expondré más adelante. Eso no funcionó. Me encontré desarrollando una teoría que no consideraba en absoluto las fuerzas fuertes como las que conocemos experimentalmente. Entonces, repentinamente se me ocurrió que estas ideas, aunque habían resultado ser

---

<sup>63</sup> Me estoy refiriendo aquí a la generalización de la electrodinámica cuántica por C. N. Yang y R. L. Mills.

completamente inútiles por lo que se refería a las fuerzas fuertes, proporcionaban una base matemática para una teoría de la fuerza nuclear débil que haría todo lo que uno pudiera desear. Pude ver la posibilidad de una teoría de la fuerza débil análoga a la electrodinámica cuántica. Del mismo modo que una fuerza electromagnética entre partículas cargadas distantes es producida por el intercambio de fotones, una fuerza débil no actuaría de golpe y en un solo punto del espacio (como en la teoría de Fermi), sino que sería producida por el intercambio de partículas tipo fotón entre partículas en posiciones diferentes. Estas nuevas partículas tipo fotón no podían ser partículas sin masa, como el fotón (por una razón, si ellas no tuvieran masa habrían sido descubiertas mucho antes), pero intervenían en la teoría de una manera tan similar a la forma en que el fotón aparece en la electrodinámica cuántica que pensé que la teoría podría ser renormalizable en el mismo sentido que la electrodinámica cuántica; es decir, que los infinitos de la teoría podrían ser cancelados mediante una redefinición de las masas y otras cantidades de la teoría. Además, la teoría estaría fuertemente limitada por sus principios subyacentes y evitaría así una gran parte de la arbitrariedad de las teorías previas.

Yo desarrollé un caso particular concreto de esta teoría, es decir, un conjunto particular de ecuaciones que gobiernan la forma en que interaccionan las partículas y respecto a las cuales la teoría de Fermi sería una aproximación válida a baja energía. Al hacer esto descubrí que, aunque no había sido mi idea de partida en absoluto, ello daba lugar no sólo a una teoría de las fuerzas débiles basada en

una analogía con el electromagnetismo, sino que resultaba ser una teoría unificada de las fuerzas débiles y electromagnéticas que demostraba que ambas eran simplemente aspectos diferentes de lo que posteriormente se llamó fuerza *electrodébil*. El fotón, la partícula fundamental cuya emisión y absorción da lugar a las fuerzas electromagnéticas, se incorporaba a un grupo familiar estrechamente unido del que formaban parte otras partículas tipo fotón predichas por la teoría: las partículas *W* eléctricamente cargadas, cuyo intercambio produce la fuerza débil de la radiactividad beta, y una partícula neutra que denominé la partícula «*Z*», sobre la que hablaré más adelante. [Las partículas *W* eran una vieja historia en las especulaciones sobre las fuerzas débiles; la *W* viene de *weak* («débil»). Para su nueva hermana escogí la letra *Z* porque la partícula tiene carga eléctrica nula, y también porque *Z* es la última letra del alfabeto y yo esperaba que éste fuera el último miembro de la familia]. La misma teoría en esencia fue desarrollada independientemente en 1968 por el físico paquistaní Abdus Salam, que trabajaba en Trieste. Algunos aspectos de esta teoría habían sido anticipados en el trabajo de Salam y John Ward, e incluso antes por mi compañero de clase en el instituto de enseñanza media y en la Universidad de Cornell, Sheldon Glashow. En lo que respecta a la unificación de las fuerzas débil y electromagnética todo estaba correcto. A uno siempre le gusta explicar cada vez más cosas a partir de cada vez menos ideas básicas, aunque ciertamente yo no me había dado cuenta de adónde iba cuando empecé. Pero en 1967 esta teoría no proporcionaba



ninguna explicación a ninguna anomalía experimental en la física de las fuerzas débiles. Tampoco explicaba esta teoría ninguna información experimental existente que no hubiese sido previamente explicada por la teoría de Fermi. La nueva teoría electrodébil apenas recibió atención al principio. Pero no creo que el poco interés que la teoría despertaba en otros físicos se debiera solamente a su falta de apoyo experimental. Igualmente, importante era una cuestión puramente teórica acerca de su consistencia interna.

Tanto Salam como yo habíamos expuesto nuestra opinión de que esta teoría eliminaría el problema de los infinitos en las fuerzas débiles. Pero no fuimos suficientemente hábiles para demostrarlo. En 1971 recibí un borrador de un artículo de un joven estudiante graduado en la Universidad de Utrecht, llamado Gerard 't Hooft, en el que pretendía haber demostrado que esta teoría había resuelto efectivamente el problema de los infinitos: todos los infinitos que aparecían en los cálculos de magnitudes observables se cancelarían exactamente igual que ocurría en la electrodinámica cuántica.

Al principio yo no estaba convencido del artículo de 't Hooft. No había oído hablar de él y el artículo utilizaba un método matemático desarrollado por Feynman en el que yo no había confiado anteriormente. Un poco más tarde oí que el teórico Ben Lee había asumido las ideas de 't Hooft y estaba tratando de obtener los mismos resultados utilizando modelos matemáticos más convencionales. Conocía a Ben Lee y tenía un gran respeto por él: si él tomó en serio el trabajo de 't Hooft, entonces yo también lo haría.

(Ben se convirtió más adelante en mi mejor amigo y colaborador en física. Se mató trágicamente en un accidente de automóvil en 1977). Después de esto, eché una mirada más detenida a lo que 't Hooft había hecho y vi que realmente había encontrado la clave para demostrar que los infinitos se cancelaban.

Después del artículo de 't Hooft, por más que todavía no existía ni un ápice de nuevo apoyo experimental para esta teoría, fue cuando la teoría electrodébil empezó a considerarse como una parte de la agenda de trabajo de la física. Éste es un caso en el que se puede precisar con detalle el nivel de interés por una teoría científica, porque se da la circunstancia de que el Instituto para la Información Científica (ISI) ha publicado una compilación del número de veces que mi primer artículo sobre la teoría electrodébil ha sido citado, a modo de ejemplo de cómo el análisis de las citas es útil para sacar ideas sobre la historia de la ciencia. El artículo fue escrito en 1967. En 1967 no fue citado ninguna vez<sup>64</sup>. En 1968 y 1969 el artículo tampoco fue citado ninguna vez. (Durante este período, Salam y yo estábamos tratando de demostrar lo que finalmente 't Hooft probaría, que la teoría estaba libre de infinitos). En 1970 fue citado una vez. (No sé quién lo hizo). En 1971, el año en que apareció el artículo de 't Hooft, mi artículo de 1967 fue citado tres veces, una de ellas por 't Hooft. En 1972, todavía sin ningún nuevo apoyo experimental, repentinamente fue citado sesenta y cinco veces. En 1973 fue citado 165 veces, y el número de

---

<sup>64</sup> Esto no es estrictamente cierto, ya que yo mencioné este artículo en una charla que di en la Conferencia Solvay de 1967 en Bruselas. Sin embargo, el ISI sólo contabiliza artículos publicados en revistas, y mi comentario se publicó en las actas de la conferencia.

citado se incrementó gradualmente hasta que en 1980 fue citado 330 veces. Un estudio reciente del ISI demostró que este artículo fue el más frecuentemente citado sobre física de partículas elementales en los 50 años precedentes<sup>xlix</sup>.

El hecho decisivo que inicialmente dio lugar a que los físicos se sintiesen estimulados por esta teoría fue el darse cuenta de que había resuelto un problema conceptual interno de la física de partículas, el problema de los infinitos en las fuerzas nucleares débiles. En 1971 y 1972 todavía no había la más mínima evidencia experimental de que esta teoría fuese mejor que la vieja teoría de Fermi.

Luego, la evidencia experimental empezó a llegar. El intercambio de la partícula  $Z$  conduciría a un nuevo tipo de fuerza nuclear débil conocido como *corriente neutra débil*, que se pondría de manifiesto en la dispersión de haces de neutrinos por los núcleos de los átomos ordinarios. (Se utiliza el término «corriente neutra» porque estos procesos no implican ningún intercambio de carga eléctrica entre el núcleo y las demás partículas). Experimentos para buscar este tipo de dispersión de neutrinos se pusieron en marcha en el CERN (un acrónimo que ha reemplazado al nombre original, Centre Européen de Recherches Nucléaires, del laboratorio paneuropeo en Ginebra) y en Fermilab (en los alrededores de Chicago). Se requirió un esfuerzo considerable. Cada experimento involucraba los servicios de 30 a 40 físicos. No es fácil hacer este tipo de experimentos a menos que se tenga una buena idea de lo que se trata de conseguir. El descubrimiento de las corrientes neutras débiles fue anunciado por

primera vez en 1973 en el CERN y, tras algunas dudas, también en Fermilab. Después de 1974, cuando Fermilab y el CERN se pusieron de acuerdo sobre la existencia de las corrientes neutras, el mundo científico llegó al convencimiento general de que la teoría electrodébil era correcta. El periódico de Estocolmo *Dagens Nyheter* llegó incluso a anunciar en 1975 que Salam y yo ganaríamos el premio Nobel de Física de ese año. (No fue así).

Podría preguntarse por qué la aceptación de la validez de la teoría electrodébil fue tan rápida y extendida. Bien, por supuesto las corrientes neutras habían sido predichas y fueron encontradas. ¿No es así como queda establecida cualquier teoría? No creo que pueda considerarse de una forma tan sencilla.

En primer lugar, las corrientes neutras no eran nada nuevo en las especulaciones sobre las fuerzas débiles. Una vez rastreeé la teoría de las corrientes neutras hasta un artículo de 1937, escrito por George Gamow y Edward Teller, que predecía la existencia de corrientes neutras débiles sobre bases muy plausibles. Había incluso evidencia experimental previa para las corrientes neutras en los años sesenta, aunque nunca fue creída; los físicos experimentales que encontraban evidencia de estas fuerzas débiles siempre daban cuenta de ella como «ruido de fondo». Algo nuevo que había en 1973, y que fue de especial importancia para los experimentadores, era una predicción de que la intensidad de las fuerzas y corrientes neutras tenía que estar dentro de un cierto rango. Por ejemplo, en un tipo de reacción de neutrinos dichas fuerzas producirían efectos de una intensidad entre un 15 y un 25

por 100 de la de las fuerzas débiles ordinarias. Esta predicción proporcionó una guía para la sensibilidad que sería necesaria en una investigación experimental de estas fuerzas. Pero lo que realmente hizo diferente al año 1973 era que había surgido una teoría que tenía el tipo de cualidad decisiva, la consistencia y rigidez interna, que ante los físicos hacía razonable la creencia de que avanzarían más en su propio trabajo científico creyendo que la teoría era cierta que dejándola pasar.

En cierto sentido, la teoría electrodébil gozó de apoyo experimental incluso antes del descubrimiento de las corrientes neutras, ya que había retrodicho correctamente todas las propiedades de las fuerzas débiles que habían sido previamente explicadas por la teoría de Fermi, así como todas las propiedades de las fuerzas electromagnéticas que habían sido descritas anteriormente por la electrodinámica cuántica. Aquí, una vez más, como en el caso de la relatividad general, uno puede preguntar por qué una retrodicción debe ser contabilizada como un éxito cuando lo que se explica ha sido ya explicado por una teoría anterior. La teoría de Fermi había explicado las características de las fuerzas débiles invocando cierto número de elementos arbitrarios, en el mismo sentido en que la ley de la inversa del cuadrado era arbitraria en la teoría de la gravitación de Newton. La teoría electrodébil explicaba dichos elementos (como la dependencia de las fuerzas débiles del espín de las partículas participantes) de una manera que no dejaba lugar a dudas. Pero no es posible ser precisos sobre tales juicios; es una cuestión de gusto y experiencia.

Repentinamente, en 1976, tres años después del descubrimiento de las corrientes neutras, se produjo una crisis. No había ya ninguna duda sobre la existencia de las corrientes neutras, pero experimentos realizados en 1976 indicaban que estas fuerzas no tenían algunas de las propiedades que la teoría predecía. La anomalía apareció en experimentos realizados en Seattle y en Oxford sobre la propagación de luz polarizada que pasa a través de vapor de bismuto. Desde el trabajo de Jean-Baptiste Biot en 1815 se sabía que la luz polarizada que pasa a través de disoluciones de ciertos azúcares experimenta una rotación de su plano de polarización hacia la derecha o hacia la izquierda. Por ejemplo, la polarización de la luz rota hacia la derecha cuando pasa a través de disoluciones de azúcar D-glucosa común, y hacia la izquierda cuando pasa a través de disoluciones de L-glucosa. Esto se debe a que una molécula de D-glucosa no es igual que su imagen especular, una molécula de L-glucosa, de la misma forma que un guante de la mano izquierda es diferente de un guante de la mano derecha (al contrario de lo que pasa con un sombrero o una corbata, que se ven iguales ya se miren directamente o reflejados en un espejo). Normalmente no se esperaría este tipo de rotación en la luz polarizada que atravesase un gas de átomos simples como los del bismuto. Pero la teoría electrodébil predecía una asimetría entre izquierda y derecha en la fuerza nuclear débil entre los electrones y los núcleos atómicos, causada por un intercambio de partículas  $Z$ , que daría a tales átomos una especie de «quiralidad» como un guante o una molécula de azúcar. (Este efecto se esperaba

particularmente grande en el bismuto debido a una peculiaridad en sus niveles de energía atómica). Los cálculos demostraban que la simetría entre izquierda y derecha en el átomo de bismuto daría lugar a que la polarización de la luz que atravesara vapor de bismuto rotase lentamente hacia la izquierda. Para su sorpresa, los físicos experimentales en Oxford y en Seattle no pudieron encontrar semejante rotación, e informaron de que, de existir tal rotación, tendría que ser mucho más pequeña que la que se había predicho. Esto cayó realmente como una bomba. Los experimentos parecían demostrar que la teoría particular que Salam y yo habíamos desarrollado independientemente en 1967-1968 posiblemente no fuera correcta en sus detalles. Pero yo no estaba dispuesto a abandonar las ideas generales de la teoría electrodébil. A partir del artículo de 't Hooft de 1971 yo me había convencido de la corrección de las líneas generales de esta teoría, aunque consideraba que la versión particular de la teoría que Salam y yo habíamos construido era solamente una posibilidad especialmente simple. Por ejemplo, podría haber otros miembros en la familia formada por el fotón y las partículas  $W$  y  $Z$ , u otras partículas relacionadas con el electrón y el neutrino. Pierre Duhem y W. van Quine señalaron hace tiempo que una teoría científica nunca puede ser absolutamente descartada por los datos experimentales porque siempre existe alguna forma de manipular la teoría o las hipótesis auxiliares para crear un acuerdo entre teoría y experimento. En algún punto, uno tiene simplemente que decidir si las elaboraciones que son necesarias para evitar el conflicto con el experimento son demasiado duras de creer.

De hecho, tras los experimentos de Oxford y Seattle muchos físicos teóricos seguimos trabajando para tratar de encontrar alguna pequeña modificación de la teoría electrodébil que explicara por qué las fuerzas de las corrientes neutras no tenían el tipo esperado de asimetría entre izquierda y derecha. Pensamos al principio que sería posible hacer la teoría sólo un poco más fea y ponerla en acuerdo con todos los datos. Recuerdo que, en cierto momento, Ben Lee voló a Palo Alto, donde yo trabajaba aquel año, y renuncié a un viaje a Yosemite planeado desde hacía mucho tiempo para trabajar con él tratando de modificar la teoría electrodébil para encajar los últimos datos (incluyendo indicios equívocos de otras discrepancias en reacciones de neutrinos de alta energía). Pero nada parecía funcionar.

Uno de los problemas consistía en que los experimentos en el CERN y en el Fermilab ya nos habían proporcionado una gran cantidad de datos sobre la dispersión de neutrinos en las colisiones con protones y neutrones, y casi todos parecían verificar la versión original de la teoría electrodébil. Era difícil ver la forma de que alguna otra teoría pudiera hacer esto y también estar de acuerdo de una forma natural con los resultados del bismuto; es decir, sin tener que introducir muchas complicaciones que fueran meticulosamente ajustadas para encajar los datos. De regreso en Harvard, un poco más tarde, Howard Georgi y yo desarrollamos un argumento general según el cual no había forma natural de hacer que la teoría electrodébil concordase con los datos procedentes de Oxford y Seattle y, al mismo tiempo, con los antiguos datos de las



reacciones de neutrinos. Por supuesto, esto no impidió que algunos teóricos siguieran construyendo teorías muy poco naturales (una actividad que llegó a ser conocida en los ambientes de Boston como cometer un acto contra natura), de acuerdo con la más antigua regla del progreso en la ciencia que afirma que es mejor estar haciendo algo que no hacer nada.

Posteriormente, en 1978, un nuevo experimento realizado en Stanford midió la fuerza débil entre electrones y núcleos atómicos de una forma completamente diferente, no utilizando los electrones en los átomos de bismuto sino dispersando un haz de electrones procedentes del acelerador de alta energía de Stanford en núcleos de deuterio. (No había nada especial en la elección del deuterio; simplemente era una fuente conveniente de protones y neutrones). Los experimentadores encontraron ahora la asimetría esperada entre izquierda y derecha. En este experimento la asimetría se manifestaba como una diferencia en el ritmo de dispersión entre los electrones que están girando a la izquierda y los que giran a la derecha. (Decimos que una partícula en movimiento está girando a la izquierda o a la derecha si los dedos de la mano izquierda o derecha apuntan en la dirección del giro cuando el pulgar apunta en la dirección del movimiento). La diferencia medida en los ritmos de dispersión era de alrededor de una parte en diez mil, que es precisamente lo que la teoría había predicho.

Repentinamente, en todas partes, los físicos de partículas llegaron a la conclusión de que, después de todo, la versión original de la teoría electrodébil era correcta. Pero nótese que había aún dos

experimentos que contradecían las predicciones de la teoría respecto a la fuerza de las corrientes neutras débiles entre electrones y núcleos frente a sólo un experimento que la apoyase, y esto en un contexto bastante diferente. Entonces, ¿por qué, en cuanto apareció un experimento que encontraba un acuerdo con la teoría electrodébil, los físicos aceptaron generalmente que la teoría debía ser correcta? Seguramente una de las razones era que todos estábamos aliviados de que no fuera necesario trabajar con ninguna de las variantes antinaturales de la teoría electrodébil original. El criterio estético de naturalidad estaba siendo utilizado para ayudar a los físicos a sopesar los conflictivos datos experimentales.

La teoría electrodébil ha seguido siendo verificada experimentalmente. El experimento de Stanford no ha sido repetido, pero varios grupos de físicos atómicos han buscado las asimetrías izquierda-derecha no sólo en el bismuto sino en otros átomos como los de talio y cesio. (Incluso antes del experimento de Stanford, un grupo en Novosibirsk había informado de haber visto la asimetría esperada en el bismuto, un informe que no fue considerado muy seriamente antes de los resultados de Stanford, debido en parte a que, en Occidente, los físicos experimentales soviéticos no tenían muy buena reputación en cuanto a precisión). Se han hecho nuevos experimentos en Berkeley y París, y los físicos de Oxford y Seattle han repetido sus experimentos<sup>65</sup>. Ahora existe un acuerdo general,

---

<sup>65</sup> Hace unos años estuve en Oxford y tuve oportunidad de preguntar a Pat Sanders, quien había dirigido el experimento de Oxford sobre el bismuto, si su grupo había descubierto qué era lo que había salido mal en el experimento anterior. Me dijo que no lo habían hecho y que, por desgracia, nunca lo harían, porque los experimentadores de Oxford habían desmontado el

tanto entre los experimentales como entre los teóricos, en que el efecto de asimetría izquierda-derecha predicho está realmente presente con la magnitud esperada tanto en átomos como en la dispersión de electrones de alta energía estudiados en el experimento en el acelerador de Stanford. Ciertamente, las verificaciones más espectaculares de la teoría electrodébil fueron los experimentos llevados a cabo por un grupo del CERN encabezado por Carlo Rubbia. En 1983 descubrieron las partículas  $W$ , y en 1984 la partícula  $Z$ , partículas cuya existencia y propiedades habían sido correctamente predichas por la teoría electrodébil en su versión original.

Mirando hacia atrás, lamento haber gastado tanto tiempo tratando de modificar la teoría electrodébil para ponerla de acuerdo con los datos de Oxford-Seattle. Desearía haber ido a Yosemite como había planeado en 1977; todavía no he estado allí. La historia completa es una bonita ilustración de una máxima, medio en serio medio en broma, atribuida a Eddington: no deberíamos creer en un experimento hasta que haya sido confirmado por la teoría.

No quiero dejarles con la impresión de que es siempre así como el experimento y la teoría se afectan mutuamente y afectan también al progreso de la ciencia. He estado realzando la importancia de la teoría porque quiero contrarrestar un punto de vista muy extendido que me parece en exceso empirista. Pero, de hecho, uno puede recorrer la historia de los experimentos importantes en física y encontrar que han jugado muchos papeles diversos y que teoría y

---

aparato y lo estaban utilizando como parte de un nuevo aparato que ahora estaba dando la respuesta correcta. Así son las cosas.

experimento han interaccionado de formas muy diferentes. Parece como si cualquier cosa que se diga sobre la forma en que la teoría y el experimento *pueden* interaccionar sea probablemente correcta, y cualquier cosa que se diga sobre la forma en que teoría y experimento *deben* interaccionar sea probablemente falsa.

La búsqueda de fuerzas débiles en forma de corriente neutra en el CERN y en Fermilab proporciona un ejemplo de la clase de experimentos que hay que emprender para verificar ideas teóricas que aún no han sido generalmente aceptadas. Estos experimentos unas veces confirman y otras veces refutan las ideas de los teóricos. Hace algunos años Frank Wilczek y yo predijimos independientemente un nuevo tipo de partícula<sup>66</sup>. Estábamos de acuerdo en llamar a esta partícula el *axión*, sin saber que éste era también el nombre de una marca de detergente. Los experimentadores buscaron el axión y no lo encontraron, al menos no con las propiedades que nosotros habíamos anticipado. La idea o bien es incorrecta o bien necesita alguna modificación<sup>67</sup>. En cierta ocasión recibí un mensaje de un grupo de físicos reunidos en Aspen que decía, «¡Lo encontramos!», pero el mensaje iba unido a una caja de detergente.

También hay experimentos que nos presentan sorpresas completas que ningún teórico hubiera anticipado. En esta categoría entran los experimentos que descubrieron los rayos X o las llamadas partículas extrañas o, para lo que nos ocupa, la anómala precesión

---

<sup>66</sup> Esto estaba en la base de un principio de simetría propuesto por Roberto Peccei y Helen Quinn.

<sup>67</sup> Tales modificaciones han sido propuestas por M. Dine, W. Fischler y M. Srednicki y por Y. Kim.

de la órbita de Mercurio. Pienso que éstos son los experimentos que más alegran el corazón de los experimentadores y los periodistas.

Están también los experimentos que nos ofrecen sorpresas *casi* completas; es decir, que descubren efectos que habían sido discutidos como una posibilidad, aunque sólo como una posibilidad lógica y para la que no había razones determinantes. Estos experimentos incluyen los que descubrieron la violación de la llamada simetría de inversión temporal y los que encontraron ciertas partículas nuevas, tales como el quark *bottom* (fondo) y un tipo de electrón muy pesado conocido como el leptón tau.

Hay también una interesante clase de experimentos que han encontrado efectos que habían sido predichos por los teóricos y que, sin embargo, fueron descubiertos accidentalmente porque los experimentadores no conocían la predicción, bien porque los teóricos no habían tenido fe suficiente en su teoría para advertírselo a los experimentadores, bien porque había demasiado ruido en los canales de comunicación científica. Entre estos experimentos figura el descubrimiento de un fondo universal de radioondas remanente del *big bang*<sup>68</sup> y el descubrimiento del positrón.

Luego están los experimentos que se hacen incluso aunque se conozca la respuesta, incluso si la predicción teórica es tan firme que la teoría está más allá de cualquier duda seria, porque los propios fenómenos son tan excitantes y ofrecen tantas posibilidades de experimentos adicionales que no queda más remedio que seguir

---

<sup>68</sup> Por Arno Penzias y Robert Wilson. He escrito sobre el descubrimiento del fondo universal en *The first three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, Basic Books, Nueva York, 1977 [hay trad. cast.: *Los tres primeros minutos del universo*, Alianza Editorial, Madrid. 1978].

adelante y encontrar estas cosas. En esta categoría incluiría el descubrimiento del antiprotón y del neutrino, y los más recientes descubrimientos de las partículas  $W$  y  $Z$ . También se incluyen aquí las búsquedas de varios efectos exóticos predichos por la relatividad general, como es la radiación gravitatoria.

Finalmente, podemos imaginar una categoría de experimentos que *refutan* teorías bien aceptadas, teorías que han llegado a ser parte del consenso estándar de la física. *Bajo esta categoría yo no puedo encontrar ningún ejemplo en los últimos cien años.* Por supuesto, existen muchos casos en que se ha encontrado que las teorías tenían un ámbito de aplicación más reducido que el que se había pensado. La teoría de Newton del movimiento no es válida a altas velocidades. La paridad, la simetría entre izquierda y derecha, no funciona en las fuerzas débiles. Y así sucesivamente. Pero en este siglo ninguna teoría que haya sido aceptada generalmente como válida en el mundo de la física ha resultado ser simplemente un *error*, del modo en que la teoría de los epiciclos de Ptolomeo para el movimiento planetario o la teoría de que el calor es un fluido llamado calórico eran errores. Pese a todo, en este siglo, como hemos visto en los casos de la relatividad general y de la teoría electrodébil, el consenso a favor de las teorías físicas ha sido alcanzado muy a menudo sobre la base de juicios estéticos antes de que la evidencia experimental a favor de estas teorías llegase a ser realmente decisiva. Veo en esto el notable poder del sentido de la belleza de los físicos que actúa conjuntamente, y a veces incluso en oposición, con el peso de la evidencia experimental.

Tal como lo he estado describiendo, el progreso del descubrimiento y validación científicos puede parecer bastante confuso. A este respecto, existe un bonito paralelismo entre la historia de la guerra y la historia de la ciencia. En ambos casos, los analistas han buscado reglas sistemáticas para maximizar las posibilidades de éxito; es decir, reglas de una ciencia de la guerra o una ciencia de la ciencia. Esto puede deberse a que tanto en la historia científica como en la historia militar, en un grado mucho mayor que en la historia política o cultural o económica, se puede trazar una línea divisoria muy clara entre la victoria y la derrota. Podemos discutir sin descanso sobre las causas y los efectos de la guerra civil norteamericana, pero no hay ninguna duda de que el ejército de Meade derrotó al de Lee en Gettysburg. Del mismo modo, no hay duda de que la concepción de Copérnico del Sistema Solar es mejor que la de Ptolomeo, y la concepción de Darwin de la evolución es mejor que la de Lamarck.

Incluso cuando no intentan formular una ciencia de la guerra, los historiadores militares escriben a menudo como si los generales perdieran batallas porque no seguían algunas reglas bien establecidas de la ciencia militar<sup>69</sup>. Por ejemplo, dos generales del ejército de la Unión en la guerra civil que llegaron a tener un descrédito generalizado son George McClellan y Ambrose Burnside. A McClellan se le censura generalmente por no estar dispuesto a enfrentarse con el enemigo, el ejército de Lee en el norte de Virginia. A Burnside se le reprocha el haber sacrificado inútilmente las vidas

---

<sup>69</sup> Un ejemplo es el de Basil Liddell Hart, el abogado del «enfoque indirecto».

de sus hombres en un asalto frontal contra un oponente bien atrincherado en Fredericksburg. No escapará a su atención que a McClellan se le critica por no actuar como Burnside, y a Burnside por no actuar como McClellan. Tanto Burnside como McClellan eran generales muy incompetentes, pero no porque no acertasen a obedecer reglas establecidas de la ciencia militar.

De hecho, los mejores historiadores militares reconocen la dificultad de establecer reglas del generalato. No hablan de una ciencia de la guerra, sino más bien de un modelo de conducta militar que no puede ser enseñada o establecida de forma exacta pero que, de un modo u otro, ayuda a veces a ganar batallas. Esto es lo que se llama el arte de la guerra<sup>70</sup>. En la misma línea pienso que no habría que esperar una ciencia de la ciencia, la formulación de reglas definidas sobre cómo deberían comportarse los científicos, sino solamente aspirar a una descripción del tipo de comportamiento que históricamente ha conducido al progreso científico: un arte de la ciencia.

---

<sup>70</sup> Debo reconocer que cuando la frase «arte de la guerra» aparece en las traducciones de las obras clásicas de Sun Tzu, Jomini y Clausewitz, la palabra «arte» se utiliza en oposición a «ciencia» como «técnica» se opone a «conocimiento», pero no en el mismo sentido en que «subjetivo» se opone a «objetivo» o «inspiración» se opone a «sistema». El uso por estos autores del término «arte» servía para resaltar que estaban escribiendo sobre el arte de la guerra porque querían ser de utilidad para la gente que realmente gana guerras, pero intentaban tratar esto de una forma científica y sistemática. El general confederado James Longstreet utilizaba el término «arte de la guerra» de una forma parecida a la que yo lo uso aquí cuando él decía que tanto McClellan como Lee eran «maestros de la ciencia, aunque no del arte de la guerra» (James Longstreet, *From Manassas to Appomattox*, Lippincott, Filadelfia, 1896, p. 288). Historiadores posteriores como Charles Oman y Cyril Falls que escriben sobre un «arte de la guerra» dejan claro que no hay un sistema de guerra. El lector que haya llegado hasta aquí comprenderá que tampoco hay un sistema de ciencia.



## Capítulo 5

### La belleza de las teorías

*A veces, mi alma contemplativa se detiene en alguna dorada nube o flor y en estos débiles esplendores vislumbra sombras de eternidad<sup>71</sup>.*

*HENRY VAUGHN, The Retreat*

En 1974 Paul Dirac vino a Harvard a hablar sobre su histórico trabajo como uno de los descubridores de la moderna electrodinámica cuántica. Al final de su charla se dirigió a nuestros estudiantes graduados y les aconsejó que se interesasen sólo en la belleza de sus ecuaciones, no en lo que las ecuaciones significaban. No era un buen consejo para estudiantes, pero la búsqueda de la belleza en la física era un tema que recorría toda la obra de Dirac y, en realidad, gran parte de la historia de la física<sup>1</sup>.

Parte del discurso sobre la importancia de la belleza en la ciencia ha sido poco más que retórica. No pretendo utilizar este capítulo simplemente para decir más cosas bonitas sobre la belleza. Más bien quiero centrarme en la naturaleza de la belleza en las teorías físicas, en por qué nuestro sentido de la belleza es a veces una guía útil y a veces no, y en qué medida la utilidad de nuestro sentido de la belleza es un signo de nuestro progreso hacia una teoría final. Un físico que dice que una teoría es bella no quiere decir exactamente

---

<sup>71</sup> [When on some gilded cloud or flowre / My gazing soul would dwell an houre, / And in those weaker glories spy / Some shadows of eternity].

lo mismo que si afirmara que una pintura concreta o una pieza musical o una poesía es bella. No es simplemente una expresión personal de placer estético; es algo mucho más próximo a lo que un preparador de caballos quiere decir cuando mira un caballo de carreras y dice que es un bello caballo. El preparador de caballos está expresando evidentemente una opinión personal, pero es una opinión sobre un hecho objetivo: el hecho de que, sobre la base de apreciaciones que el preparador no podría fácilmente expresar, éste es el tipo de caballo que gana carreras.

Por supuesto, diferentes preparadores de caballos pueden tener diferentes opiniones sobre un caballo. Gracias a esto existen las carreras de caballos. Pero el sentido estético del preparador de caballos es un medio para un fin objetivo: el de seleccionar caballos que ganen carreras. Naturalmente, el sentido de la belleza del físico sirve para un propósito; se supone que ayuda al físico a seleccionar ideas que nos ayudan a explicar la naturaleza. Los físicos, como los preparadores de caballos, pueden estar acertados o equivocados en sus juicios, pero no están simplemente divirtiéndose. A menudo sí se están divirtiendo, pero éste no es el propósito general de sus juicios estéticos.

Esta comparación plantea más preguntas de las que responde. En primer lugar, ¿qué es una teoría bella? ¿Cuáles son las características de las teorías físicas que nos dan un sentido de belleza? Una pregunta más difícil: ¿por qué el sentido de la belleza de un físico funciona cuando lo hace? Las historias narradas en el capítulo anterior ilustran el hecho más bien inquietante de que algo

tan personal y subjetivo como nuestro sentido de la belleza nos ayuda no sólo a inventar teorías físicas sino incluso a juzgar la validez de las teorías. ¿Por qué estamos dotados de tal intuición estética? El esfuerzo para responder la pregunta plantea otra pregunta aún más difícil, aunque quizá suene trivial: ¿qué es lo que el físico desea lograr?

¿Qué es una teoría bella? El conservador de un gran museo de arte norteamericano se indignó en cierta ocasión por mi utilización de la palabra «belleza» en relación con la física. Decía que, en su área de trabajo, los profesionales habían dejado de utilizar esta palabra porque se dieron cuenta de lo imposible que resultaba definirla. Hace mucho tiempo el físico y matemático Henri Poincaré admitía que «puede ser muy difícil definir la belleza matemática, pero ocurre lo mismo con cualquier tipo de belleza».

No trataré de definir la belleza, como tampoco trataré de definir el amor o el miedo. Usted no define estas cosas; usted las conoce cuando las siente. Más tarde, después de que eso se ha producido, usted a veces puede ser capaz de decir algo para describirlo, y eso es lo que yo trataré de hacer aquí.

Por la belleza de una teoría física yo no entiendo simplemente la belleza mecánica de sus signos en la página impresa. El poeta metafísico Thomas Traherne se esforzó en que sus poemas formasen bellas figuras en el papel, pero esto no es parte de la tarea de la física. También distinguiré el tipo de belleza de la que estoy hablando aquí de la cualidad que los matemáticos y los físicos llaman a veces elegancia. Una prueba o un cálculo elegante es aquel

que consigue un resultado poderoso con un mínimo de complicaciones irrelevantes. No es importante para la belleza de una teoría el que sus ecuaciones tengan soluciones elegantes. Las ecuaciones de la relatividad general resultan difíciles de resolver excepto en las situaciones más sencillas, pero esto no está en contra de la belleza de la teoría misma. Según palabras de Einstein, los científicos deberían dejar la elegancia para los sastres.

La simplicidad es parte de lo que yo entiendo por belleza, pero se trata de una simplicidad de ideas, no de la simplicidad de tipo mecánico que puede medirse contando ecuaciones o símbolos. Tanto la teoría de la gravitación de Einstein como la de Newton incluyen ecuaciones que determinan las fuerzas gravitatorias producidas por una cantidad dada de materia. En la teoría de Newton existen tres de estas ecuaciones (correspondientes a las tres dimensiones del espacio), mientras que en la teoría de Einstein existen catorce<sup>72</sup>. En sí mismo esto no puede ser contabilizado como una ventaja estética de la teoría de Newton sobre la de Einstein. Y de hecho, es la teoría de Einstein la que es más bella, debido en parte a la simplicidad de su idea central de la equivalencia de gravitación e inercia. Ésta es una apreciación en la que los físicos han coincidido generalmente y, como hemos visto, es responsable en gran medida de la temprana aceptación de la teoría de Einstein. Existe otra cualidad, además de la simplicidad, que puede hacer bella a una teoría física: es el sentido de inevitabilidad que la teoría puede darnos. Al oír una obra musical o escuchar un soneto, uno

---

<sup>72</sup> Me estoy refiriendo a las diez ecuaciones de campo más las cuatro ecuaciones de movimiento.

siente a veces un intenso placer estético en el sentido de que nada en la obra podría ser cambiado, que no existe una nota o una palabra que a uno le hubiera gustado que fuera diferente. En la *Sagrada Familia* de Rafael la colocación de cada figura en el lienzo es perfecta. Quizá no sea de entre todas su pintura favorita, pero cuando usted mira esa pintura, no existe nada que quisiera que Rafael hubiera hecho de otro modo. Lo mismo es verdadero en parte (aunque no sea más que en parte) para la relatividad general. Una vez que usted conoce los principios físicos generales adoptados por Einstein, usted comprende que Einstein no hubiera podido llegar a otra teoría de la gravitación significativamente diferente. Como decía Einstein acerca de la relatividad general, «el atractivo principal de la teoría reside en su compleción lógica. Si una sola de las conclusiones deducidas de ella resultase falsa, debería ser abandonada; modificarla sin destruir la estructura global parece algo imposible<sup>li</sup>».

Esto ya es menos cierto para la teoría de la gravitación de Newton. Newton podría haber supuesto que la fuerza gravitatoria decrece con la inversa del cubo de la distancia, en lugar de la inversa del cuadrado, si eso es lo que hubieran demandado los datos astronómicos, pero Einstein no podría haber incorporado una ley de la inversa del cubo en su teoría sin aplastar sus bases conceptuales. De este modo, las catorce ecuaciones de Einstein tienen una inevitabilidad, y consiguientemente una belleza, de la que carecen las tres ecuaciones de Newton. Pienso que esto es lo que Einstein quería decir cuando calificaba de bello al miembro de las ecuaciones

que incluye al campo gravitatorio en su teoría de la relatividad general, como si estuviese hecho de mármol, en contraste con el otro miembro de las ecuaciones, el referente a la materia, del que decía que seguía siendo feo, como si estuviera hecho de simple madera. La forma en que el campo gravitatorio entra en las ecuaciones de Einstein es casi inevitable, pero nada en la relatividad general explica por qué la materia toma la forma que toma.

El mismo sentido de inevitabilidad puede encontrarse (de nuevo sólo en parte) en nuestro moderno modelo estándar de las fuerzas fuerte y electrodébil que actúan sobre las partículas elementales. Existe una característica común que da tanto a la relatividad general como al modelo estándar buena parte de su sentido de inevitabilidad y de simplicidad: ambos obedecen a *principios de simetría*.

Un principio de simetría es simplemente una afirmación de que algo se ve igual desde diferentes puntos de vista. De todas las simetrías, la más sencilla es la simetría bilateral aproximada del rostro humano. Debido a que hay poca diferencia entre los dos lados de nuestro rostro, éste parece el mismo ya lo veamos directamente o cuando la izquierda y la derecha se invierten, como sucede cuando usted se mira en un espejo. Es casi un tópico de director de cine dejar que la audiencia se dé cuenta repentinamente de que el rostro del actor que habían estado observando estaba siendo visto a través de un espejo; la sorpresa hubiera desaparecido si las personas tuvieran dos ojos en el mismo lado del rostro como los lenguados, y siempre en el mismo lado.

Algunas cosas tienen simetrías más amplias que las del rostro

humano. Un cubo se ve igual cuando se le mira desde seis direcciones diferentes, todas ellas formando ángulos rectos, además de cuando se invierten la izquierda y la derecha. Los cristales perfectos se ven igual no sólo cuando se miran desde varias direcciones diferentes, sino también cuando desplazamos nuestras posiciones dentro del cristal en ciertas cantidades en varias direcciones. Una esfera se ve igual desde cualquier dirección. El espacio vacío se ve igual desde todas las direcciones y desde todas las posiciones.

Simetrías como éstas han divertido e intrigado a los artistas y científicos durante milenios, pero en la práctica, no jugaron un papel central en la ciencia. Sabemos muchas cosas sobre la sal y el hecho de que sea un cristal cúbico, y por lo tanto se vea igual desde seis diferentes puntos de vista, no está entre las cosas más importantes. Ciertamente la simetría bilateral tampoco es la cosa más interesante del rostro humano. Las simetrías que son realmente importantes en la naturaleza no son las simetrías de las cosas, sino las simetrías de las *leyes*.

Una simetría de las leyes de la naturaleza es una afirmación de que seguimos descubriendo las mismas leyes de la naturaleza cuando hacemos ciertos cambios en el punto de vista desde el que observamos los fenómenos naturales. Tales simetrías se denominan a veces principios de *invariancia*. Por ejemplo, las leyes de la naturaleza que descubrimos toman la misma forma independientemente de cómo estén orientados nuestros laboratorios; no supone ninguna diferencia el que midamos las

direcciones respecto al norte o al noreste, a la vertical o respecto a cualquier otra dirección. Esto no era tan obvio para los filósofos naturales antiguos o medievales; en la vida cotidiana ciertamente parece existir una diferencia entre la vertical y la dirección horizontal. Sólo con el nacimiento de la ciencia moderna en el siglo XVII se hizo claro que abajo parece diferente de arriba o norte sólo porque bajo nosotros resulta haber una gran masa, la Tierra, y no (como pensaba Aristóteles) debido a que el lugar natural de las cosas pesadas o ligeras esté hacia abajo o hacia arriba respectivamente. Nótese que esta simetría no dice que arriba sea lo mismo que abajo; los observadores que miden distancias hacia arriba o hacia abajo de la superficie de la Tierra darán diferentes descripciones de sucesos tales como la caída de una manzana, pero descubrirán las mismas leyes, tal como la ley de que las manzanas son atraídas por grandes masas como la Tierra.

Las leyes de la naturaleza también toman la misma forma dondequiera que estén situados nuestros laboratorios; no supone diferencia para nuestros resultados el que nuestros experimentos se realicen en Texas o en Suiza o en algún planeta en el otro extremo de la galaxia. Las leyes de la naturaleza toman la misma forma independientemente de cómo pongamos en marcha nuestros relojes; no supone diferencia el que datemos los sucesos a partir de la Hégira, del nacimiento de Cristo o del comienzo del universo. Esto no quiere decir que nada cambie con el tiempo o que Texas sea exactamente igual que Suiza; solamente que las leyes descubiertas en diferentes tiempos y en diferentes lugares son las mismas. Si no



existieran estas simetrías el trabajo de la ciencia debería ser rehecho en cada nuevo laboratorio y a cada nuevo instante.

Cualquier principio de simetría es al mismo tiempo un principio de simplicidad. Si las leyes de la naturaleza distinguieran entre direcciones como arriba o abajo o norte, entonces tendríamos que poner algo en nuestras ecuaciones para indicar la orientación de nuestros laboratorios y éstas serían menos sencillas. En realidad, la propia notación que utilizan los matemáticos y los físicos para que nuestras ecuaciones aparezcan tan sencillas y tan compactas como sea posible se ha basado en la hipótesis de que todas las direcciones del espacio son equivalentes.

Si estas simetrías de las leyes de la naturaleza ya son importantes en física clásica, su importancia es aún mayor en mecánica cuántica. Consideremos qué es lo que hace a un electrón diferente de otro. Sólo su energía, su momento y su espín; aparte de estas propiedades, cada electrón en el universo es igual que cualquier otro. Todas estas propiedades de un electrón son simplemente magnitudes que caracterizan la forma en que la función de onda mecanocuántica del electrón responde a transformaciones de simetría: a cambios en la forma en que ponemos en marcha nuestros relojes o en la situación u orientación de nuestro laboratorio<sup>73</sup>. La materia pierde así su papel central en la física:

---

<sup>73</sup> Por ejemplo, la frecuencia con la que oscila la función de onda de cualquier sistema en un estado de energía definida viene dada por la energía dividida por una constante de la naturaleza conocida como constante de Planck. Este sistema se parece mucho al de dos observadores que han puesto en marcha sus relojes con una diferencia de un segundo, pero, si ambos observan el sistema cuando las manecillas de sus relojes señalan precisamente las doce en punto, observan que la oscilación está en una fase diferente; puesto que sus relojes tienen una marcha diferente ellos observan realmente el sistema en tiempos diferentes, de modo que un observador

todo lo que queda son principios de simetría y las diferentes formas en que las funciones de onda pueden comportarse bajo transformaciones de simetría.

Existen simetrías del espacio-tiempo que son menos obvias que estas simples traslaciones o rotaciones. Las leyes de la naturaleza también resultan tomar la misma forma para observadores que se mueven a diferentes velocidades constantes; no supone diferencia el que hagamos nuestros experimentos aquí en el Sistema Solar, moviéndonos alrededor del centro de la galaxia a cientos de kilómetros por segundo, o en una galaxia distante que se aleja de la nuestra a decenas de miles de kilómetros por segundo. Este último principio de simetría es llamado a veces principio de relatividad. Hay una creencia muy extendida de que este principio fue inventado

---

puede, por ejemplo, ver una cresta en la onda, mientras el otro ve un valle. Concretamente, las fases de ambos difieren en el mínimo de ciclos (o partes de ciclos) que ocurren en un segundo; en otras palabras, en la frecuencia de la oscilación en ciclos por segundo, y, por lo tanto, en la energía dividida por la constante de Planck. En la mecánica cuántica actual *definimos* la energía de cualquier sistema como el cambio en la fase (en ciclos o partes de ciclos) de la función de onda del sistema en un instante de un *reloj* dado cuando desplazamos en un segundo la puesta en marcha de nuestros relojes. La constante de Planck interviene sólo porque la energía se medía históricamente en unidades como calorías o kilovatios hora o electrónvoltios que fueron adoptadas antes del advenimiento de la mecánica cuántica; la constante de Planck simplemente proporciona el factor de conversión entre estos viejos sistemas de unidades y la unidad natural mecanocuántica de energía, que es el ciclo por segundo. Puede demostrarse que la energía definida de este modo tiene todas las propiedades que asociamos normalmente con la energía, incluyendo la de su conservación; en realidad, la invariancia de las leyes de la naturaleza bajo la transformación de simetría consistente en reiniciar nuestros relojes es la *razón de que* exista algo como la energía. De manera muy similar, la componente del momento de cualquier sistema en cualquier dirección particular se define como el cambio de fase de la función de onda cuando desplazamos en un centímetro en dicha dirección el punto a partir del cual se miden las posiciones, multiplicado de nuevo por la constante de Planck. La magnitud del giro de un sistema en torno a cualquier eje se define como el cambio de la fase de la función de onda cuando rotamos el sistema de referencia que utilizamos para medir direcciones en torno a dicho eje en una vuelta completa, multiplicado por la constante de Planck. Desde este punto de vista, el momento y el espín son lo que son debido a la simetría de las leyes de la naturaleza bajo cambios en el sistema de referencia que utilizamos para medir posiciones o direcciones en el espacio. (Al enumerar las propiedades de los electrones no incluyo la posición, porque la posición y el momento son propiedades complementarias; podemos describir el estado de un electrón en términos de su posición o de su momento pero no de ambos simultáneamente).

por Einstein, pero también había un principio de relatividad en la teoría de la mecánica de Newton; la diferencia reside sólo en la forma en que la velocidad del observador afecta a las observaciones de las posiciones y de los tiempos en las dos teorías. Pero Newton dio por supuesta su versión del principio de relatividad; Einstein diseñó explícitamente su versión del principio de relatividad para que fuera compatible con un hecho experimental, el que la velocidad de la luz es la misma independientemente del movimiento del observador. En este sentido, el énfasis sobre la simetría como una cuestión de física en el artículo de Einstein de 1905 sobre la relatividad especial marca el comienzo de la actitud moderna respecto a los principios de simetría.

La diferencia más importante entre los modos en que las observaciones de las posiciones espacio-temporales quedan afectadas por el movimiento de los observadores en la física de Newton y en la de Einstein es que en la relatividad especial no existe significado absoluto para la afirmación de que dos sucesos distantes son simultáneos. Un observador puede ver que dos relojes marcan las doce en punto en el mismo instante; otro observador, que se está moviendo con respecto al primero, encuentra que un reloj marca las doce antes o después que el otro. Como señalamos antes, esto hace que la teoría de la gravitación de Newton, o cualquier teoría de fuerzas similar, sea incompatible con la relatividad especial. La teoría de Newton nos dice que la fuerza gravitatoria que el Sol ejerce sobre la Tierra en cualquier instante depende de la masa del Sol en ese mismo instante, pero ¿el mismo instante según quién?

La forma natural de evitar este problema es abandonar la vieja idea newtoniana de acción instantánea a distancia y reemplazarla por una imagen de la fuerza como debida a *campos*. En esta imagen, el Sol no atrae directamente a la Tierra; en lugar de ello, crea un campo, llamado campo gravitatorio, que luego ejerce una fuerza sobre la Tierra. Esto podría parecer una distinción sin apenas diferencia, pero existe una diferencia esencial; cuando se produce una erupción en el Sol, afecta en primer lugar al campo gravitatorio en las proximidades del Sol, después de lo cual el minúsculo cambio en el campo se propaga a través del espacio a la velocidad de la luz como las ondas que se dispersan desde el punto en el que una piedra cae en el agua, y sólo alcanzan la Tierra unos 8 minutos más tarde. Todos los observadores que se mueven a cualquier velocidad constante coinciden en esta descripción, porque en la relatividad especial todos los observadores coinciden en la velocidad de la luz. Del mismo modo, un cuerpo eléctricamente cargado crea campo, llamado campo electromagnético, que ejerce fuerzas eléctricas y magnéticas sobre otros cuerpos cargados. Cuando un cuerpo eléctricamente cargado es movido repentinamente, el campo electromagnético cambia en un primer momento sólo cerca de dicho cuerpo, y los cambios en este campo se propagan a continuación a la velocidad de la luz. De hecho, en este caso, los cambios en el campo electromagnético *son* lo que conocemos como luz, aunque a menudo se trata de luz cuya longitud de onda es tan corta o tan larga que no resulta visible para nosotros.

En el contexto de la física precuántica la teoría de la relatividad

especial de Einstein se encuadra en una concepción dualista de la naturaleza: existen partículas, como los electrones, protones o neutrones en los átomos ordinarios, y existen campos, como el campo gravitatorio o el electromagnético. El advenimiento de la mecánica cuántica conduce a una concepción mucho más unificada. Desde el punto de vista mecanocuántico, la energía y el momento de un campo como el campo electromagnético vienen en paquetes, conocidos como fotones, que se comportan exactamente como partículas que no tienen masa. Análogamente, la energía y el momento del campo gravitatorio vienen en paquetes llamados gravitones, que también se comportan como partículas de masa nula<sup>74</sup>. En un campo de fuerzas a gran escala, como es el campo gravitatorio del Sol, no notamos los gravitones individuales esencialmente porque existen muchos de ellos.

En 1929 Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli (basándose en el trabajo anterior de Max Born, Heisenberg, Pascual Jordan y Eugene Wigner) explicaron en un par de artículos de qué forma las partículas masivas como el electrón podían entenderse también como paquetes de energía y momento en diferentes tipos de campos, tales como el campo electrónico. De la misma forma que la fuerza electromagnética entre dos electrones se debe en mecánica cuántica al intercambio de fotones, la fuerza entre fotones y electrones es debida al intercambio de electrones. La distinción entre materia y fuerza deja de ser esencial: cualquier partícula puede representar el

---

<sup>74</sup> Los gravitones no han sido detectados experimentalmente, pero esto no constituye una sorpresa; los cálculos demuestran que interaccionan tan débilmente que los gravitones individuales no podrían haber sido detectados en ningún experimento realizado hasta la fecha. De todas formas, no hay dudas serias sobre su existencia.

papel de un cuerpo de prueba sobre el que actúan fuerzas y su intercambio puede producir otras fuerzas. Hoy día se acepta generalmente que la única forma de combinar los principios de la relatividad especial y de la mecánica cuántica es a través de la teoría cuántica de campos o algo muy similar. Éste es precisamente el tipo de rigidez lógica que da su belleza a una teoría realmente fundamental: la mecánica cuántica y la relatividad especial son casi incompatibles, y su reconciliación en la teoría cuántica de campos impone poderosas restricciones a la forma en que las partículas pueden interaccionar mutuamente.

Todas las teorías mencionadas hasta ahora solamente limitan los tipos de fuerza y de materia que una teoría puede contener: en sí mismas no *requieren* la existencia de ningún tipo particular de materia o de fuerza. Los principios de simetría han alcanzado un nuevo nivel de importancia en este siglo, y especialmente en las últimas décadas: hay principios de simetría que dictan la existencia misma de todas las fuerzas conocidas de la naturaleza.

El principio de simetría subyacente en la relatividad general establece que *todos* los sistemas de referencia son equivalentes: las mismas leyes de la naturaleza aparecen no sólo para observadores que se mueven a velocidad constante sino para todos los observadores, cualquiera que sea la aceleración o el movimiento de rotación de sus laboratorios. Supongamos que sacamos nuestros aparatos del reposo de un laboratorio universitario y hacemos nuestros experimentos en un tiovivo que gira a velocidad constante. En lugar de medir las direcciones con relación al norte las podemos

medir con respecto a los caballitos fijos en la plataforma giratoria. A primera vista, las leyes de la naturaleza parecerán bastante diferentes. Los observadores en un tiovivo en rotación observan una fuerza centrífuga que parece empujar a los objetos libres hacia el borde de la plataforma. Si ellos hubieran nacido y crecido en el tiovivo, y no supieran que estaban en una plataforma rotatoria, describirían la naturaleza en términos de leyes de la mecánica que incorporan esta fuerza centrífuga, leyes que parecen bastante diferentes de las descubiertas por el resto de nosotros.

El hecho de que las leyes de la naturaleza parezcan distinguir entre sistemas de referencia en reposo y en rotación inquietó a Isaac Newton y continuó causando problemas a los físicos en los siglos siguientes. En los años ochenta del siglo pasado, el físico y filósofo vienés Ernst Mach señaló el camino hacia una posible reinterpretación. Mach hizo hincapié en que había algo más, aparte de la fuerza centrífuga, que distinguía el tiovivo en rotación de los laboratorios más convencionales. Desde el punto de vista de un astrónomo en el tiovivo, el Sol, las estrellas, las galaxias, en realidad la totalidad de la materia del universo parece estar girando alrededor del cénit. Usted o yo diríamos que esto se debe a que el tiovivo está girando, pero un astrónomo que hubiera crecido en el tiovivo y lo utilizara como su sistema de referencia natural insistiría en que es el resto del universo el que está girando en torno a él. Mach se preguntaba si habría alguna forma de que esta gran circulación aparente de materia pudiera ser tenida como responsable de la fuerza centrífuga. Si así fuera, entonces las leyes

de la naturaleza descubiertas en el tiovivo podrían ser realmente las mismas que las descubiertas en laboratorios más convencionales; la diferencia aparente se debería simplemente al entorno diferente que ven los observadores en sus diferentes laboratorios.

La idea de Mach fue recogida por Einstein y concretada en su teoría de la relatividad general. En la relatividad general existe realmente una influencia ejercida por las estrellas distantes que crea el fenómeno de fuerza centrífuga en un tiovivo giratorio: es la fuerza de gravedad. Por supuesto, nada parecido sucede en la teoría de la gravitación de Newton, que trabaja sólo con una atracción simple entre todas las masas. La relatividad general es más complicada; la circulación de la materia del universo alrededor del cénit que ven los observadores del tiovivo produce un campo en cierto modo similar al campo magnético producido por la circulación de electricidad en las bobinas de un electroimán. Es este campo «gravitomagnético» el que en el sistema de referencia del tiovivo produce los efectos que en los sistemas de referencia más convencionales se atribuyen a la fuerza centrífuga. Las ecuaciones de la relatividad general, a diferencia de las de la mecánica newtoniana, son exactamente las mismas en el laboratorio del tiovivo que en los laboratorios convencionales; la diferencia entre lo que se observa en estos laboratorios se debe enteramente a su diferente entorno: un universo que gira alrededor del cénit o uno que no lo hace. Pero, si la gravitación no existiera, esta reinterpretación de la fuerza centrífuga sería imposible, y la fuerza centrífuga experimentada en un tiovivo nos permitiría distinguir entre el tiovivo y los laboratorios más convencionales y,



por lo tanto, descartaría cualquier posible equivalencia entre los laboratorios que están rotando y los que no lo hacen. *Por consiguiente, la simetría entre diferentes sistemas de referencia requiere la existencia de la gravitación.*

La simetría subyacente en la teoría electrodébil es un poco más esotérica. No tiene que ver con cambios en nuestro punto de vista en el espacio y el tiempo sino más bien con cambios en nuestro punto de vista sobre la identidad de los diferentes tipos de partículas elementales. Del mismo modo que es posible para una partícula estar en un estado mecanocuántico en el que no está exactamente ni aquí ni allí, o no está girando exactamente en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario, así también por las maravillas de la mecánica cuántica es posible tener una partícula en un estado en el que no es ni exactamente un electrón ni exactamente un neutrino hasta que medimos alguna propiedad que los distinga, como es la carga eléctrica. En la teoría electrodébil, la forma de las leyes de la naturaleza permanece sin cambios si reemplazamos los electrones y neutrinos, dondequiera que aparezcan en nuestras ecuaciones, por tales estados combinados que no son ni electrones ni neutrinos. Debido a que otros varios tipos de partículas interactúan con los electrones y con los neutrinos, es necesario al mismo tiempo combinar familias de estos otros tipos de partículas tales como los quarks *up* (arriba) con los quarks *down* (abajo)<sup>75</sup>, tanto como los fotones con sus hermanos,

---

<sup>75</sup> Estrictamente hablando, son sólo los estados zurdos del electrón, el neutrino y los quarks arriba-y-abajo los que constituyen estas familias. (Por zurdos, quiero decir que la partícula gira en la dirección en que se cierran los dedos de la mano izquierda cuando el pulgar se extiende a

las partículas  $W$  cargadas positiva y negativamente y la partícula neutra  $Z$ . Ésta es la simetría que conecta las fuerzas electromagnéticas que son producidas por un intercambio de fotones, con las fuerzas nucleares débiles que son producidas por el intercambio de las partículas  $W$  y  $Z$ . El fotón y las partículas  $W$  y  $Z$  aparecen en la teoría electrodébil como paquetes de energía de cuatro campos, campos que son requeridos por esta simetría de la teoría electrodébil de la misma forma que el campo gravitatorio es requerido por las simetrías de la relatividad general.

Las simetrías del tipo subyacente a la teoría electrodébil se denominan *simetrías internas*, porque podemos pensar que están relacionadas con la naturaleza intrínseca de las partículas más que con su posición o movimiento. Las simetrías internas son menos familiares que las que actúan en el espacio y el tiempo ordinarios, tales como las que gobiernan la relatividad general. Podemos imaginar que cada partícula lleva una pequeña esfera de reloj, con un puntero que apunta en direcciones marcadas como «electrón», «neutrino» o «fotón» o « $W$ » o cualquiera otra intermedia. La simetría interna dice que las leyes de la naturaleza toman la misma forma si damos ciertos giros a las marcas de estas esferas.

Además, para el tipo de simetría que gobierna las fuerzas

---

lo largo del eje de rotación de la partícula apuntando en la dirección de movimiento de la partícula). Esta diferencia entre las familias formadas por estados zurdos y diestros es el origen de que las fuerzas nucleares débiles no respeten la simetría entre izquierda y derecha. (La asimetría entre derecha e izquierda en las fuerzas débiles fue propuesta en 1956 por los teóricos T. D. Lee y C. N. Yang. Fue verificada en experimentos sobre desintegración nuclear beta por C. S. Wu en colaboración con un grupo del National Bureau of Standards en Washington, y en experimentos sobre desintegración del mesón pi por R. L. Garwin, L. Lederman y M. Weinrich, y por J. Friedman y V. Teledgi). Aún no sabemos por qué son sólo los electrones, neutrinos y quarks zurdos los que forman estas familias. Esto constituye un desafío para las teorías que se proponen ir más allá del modelo estándar de las partículas elementales.

electrodébiles podemos girar las esferas de forma diferente para partículas en diferentes instantes o posiciones. Esto es muy similar a lo que ocurre con la simetría subyacente en la relatividad general, que nos permite girar nuestro laboratorio no sólo en algún ángulo fijo sino también en un ángulo que crece con el tiempo colocándolo en un ti vivo. La invariancia de las leyes de la naturaleza bajo un grupo de tales transformaciones de simetría interna dependientes de la posición y del tiempo se denomina simetría *local* (debido a que el efecto de las transformaciones de simetría depende de la localización en el espacio y el tiempo) o simetría *gauge* (por razones que son puramente históricas<sup>76</sup>). Es la simetría local entre diferentes sistemas de referencia en el espacio y en el tiempo la que hace necesaria la gravitación y, análogamente, es una segunda simetría local entre electrones y neutrinos (y entre quarks *up* y quarks *down* y demás) la que hace necesaria la existencia del campo fotónico, del campo W y del campo Z.

Todavía existe una tercera simetría local exacta asociada con la propiedad interna de los quarks que se conoce figuradamente como *color*<sup>77</sup>. Hemos visto que existen quarks de varios tipos, como los quarks *up* y *down* que constituyen los protones y neutrones que se

---

<sup>76</sup> En 1918 el matemático Hermann Weyl propuso que la simetría de la relatividad general bajo cambios de posición dependientes del espacio-tiempo debería ser suplementada con una simetría bajo cambios en la forma en que uno mide (o «calibra») las distancias y los tiempos. Este principio de simetría fue pronto abandonado por los físicos (aunque algunas versiones del mismo aparecen de vez en cuando en teorías especulativas) pero es matemáticamente muy similar a una simetría interna de las ecuaciones de la electrodinámica y, por consiguiente, puede ser denominada invariancia «gauge» (calibre). Más adelante, cuando un tipo de simetría interno local más complicado fue introducida en 1954 por C. N. Yang y R. L. Mills (en un intento de explicar la fuerza nuclear fuerte) también fue denominada simetría «gauge».

<sup>77</sup> Varias versiones del atributo de los quarks conocido como color fueron sugeridas por O. W. Greenberg; M. Y. Han y Y. Nambu; y W. A. Bardeen, H. Fritzsch y M. Gell-Mann.

encuentran en todos los núcleos atómicos ordinarios. Además, cada uno de estos tipos de quarks se da en tres diferentes «colores» que los físicos (al menos en los Estados Unidos) suelen llamar rojo, blanco y azul. Por supuesto, esto no tiene nada que ver con el color ordinario; se trata simplemente de una etiqueta utilizada para distinguir diferentes subvariedades de quarks. Por lo que sabemos, existe una simetría exacta en la naturaleza entre los diferentes colores; la fuerza entre un quark rojo y un quark blanco es la misma que entre un quark blanco y un quark azul, y la fuerza entre dos quarks rojos es la misma que entre dos quarks azules. Pero esta simetría va más allá de los meros intercambios de colores. En mecánica cuántica podemos considerar estados de un solo quark que no son ni exactamente rojos ni exactamente blancos ni exactamente azules. Las leyes de la naturaleza toman exactamente la misma forma si reemplazamos los quarks rojo, blanco y azul por quarks en tres combinaciones de estados apropiadas (por ejemplo, púrpura, rosa e índigo). Una vez más, en analogía con la relatividad general, el hecho de que las leyes de la naturaleza no se vean afectadas incluso si las combinaciones varían de un lugar a otro y de un instante a otro hace necesario incluir en la teoría una familia de campos que interaccionan con los quarks, análogos al campo gravitatorio. Existen ocho de estos campos: se conocen como campos gluónicos<sup>78</sup> debido a que las fuerzas fuertes a que dan lugar mantienen pegados los quarks en el interior del protón y del neutrón. Nuestra moderna teoría de tales fuerzas, *la cromodinámica*

---

<sup>78</sup> Del inglés to *glue*, 'pegar'. (N. del t.)

*cuántica*, no es nada más que la teoría de quarks y gluones que respeta esta simetría de color local. El modelo estándar de las partículas elementales consiste en la teoría electrodébil combinada con la cromodinámica cuántica.

He estado diciendo que los principios de simetría dan una especie de rigidez a las teorías. Usted podría pensar que esto es una desventaja, que el físico trata de desarrollar teorías que sean capaces de describir una amplia variedad de fenómenos y, por lo tanto, le gustaría descubrir teorías que sean lo más flexibles posible; teorías que tengan sentido en una amplia variedad de circunstancias posibles. Esto es cierto en muchas áreas de la ciencia, pero no es cierto en este tipo de física fundamental. Estamos tras las huellas de algo universal, algo que gobierna los fenómenos físicos en todo el universo, algo que llamamos las leyes de la naturaleza. No queremos descubrir una teoría que sea capaz de describir todos los tipos de fuerza imaginables entre las partículas de la naturaleza. Antes bien, esperamos una teoría que rígidamente nos permita describir sólo aquellas fuerzas, gravitatorias electrodébiles y fuertes, que realmente resultan existir. Este tipo de rigidez en nuestras teorías físicas es parte de lo que reconocemos como belleza.

No son sólo los principios de simetría los que dan rigidez a nuestras teorías. Solamente sobre la base de los principios de simetría no estaríamos abocados a la teoría electrodébil o a la cromodinámica cuántica, excepto como un caso especial de una variedad mucho mayor de teorías con un número ilimitado de parámetros ajustables

que podrían ser introducidos en la teoría con cualquier valor que quisiéramos. La restricción adicional que nos permitía escoger nuestro modelo estándar sencillo de entre la variedad de las demás teorías más complicadas que satisfacen los mismos principios de simetría, era la condición de que los infinitos que aparecen en los cálculos que utilizan la teoría deberían cancelarse. (Es decir, la teoría debe ser «renormalizable<sup>79</sup>»). Resulta que esta condición impone un alto grado de simplicidad a las ecuaciones de la teoría y, junto con las diversas simetrías locales, sigue un largo camino hasta dar una forma única a nuestro modelo estándar de las partículas elementales.

La belleza que encontramos en teorías físicas como la relatividad general o el modelo estándar es muy parecida a la belleza que les confiere a algunas obras de arte la sensación de inevitabilidad que nos sugieren: la sensación de que uno no quisiera cambiar una sola nota o una pincelada o una línea. Pero, del mismo modo que en nuestra apreciación de la música o la pintura o la poesía, esta sensación de inevitabilidad es una cuestión de gusto y experiencia y no puede ser reducida a fórmulas.

Cada dos años el Lawrence Berkeley Laboratory publica un folleto con la lista de las propiedades de las partículas elementales que se conocen hasta la fecha. Si yo digo que el principio fundamental que gobierna la naturaleza es que las partículas elementales tienen las propiedades que figuran en este folleto, entonces es trivialmente verdadero que las propiedades conocidas de las partículas

---

<sup>79</sup> Pero véanse los comentarios en el capítulo 8 matizando este requisito.

elementales se siguen inevitablemente de este principio fundamental. Este principio tiene incluso poder predictivo: cada nuevo electrón o protón creado en nuestros laboratorios resultará tener la masa y la carga que figuran en el folleto. Pero el principio mismo es tan poco atractivo que nadie sentiría que se ha conseguido algo. Su fealdad reside en su falta de simplicidad e inevitabilidad; el folleto contiene miles de números, cada uno de los cuales podría cambiarse sin resultar contradictorio con el resto de la información. No hay fórmula lógica que establezca una nítida línea divisoria entre una bella teoría explicativa y una simple lista de datos, pero conocemos la diferencia cuando la vemos: demandamos una simplicidad y rigidez en nuestros principios antes de estar dispuestos a tomarlos seriamente. Por consiguiente, nuestro juicio estético no es sólo un medio para el fin de encontrar explicaciones científicas y juzgar su validez: *es parte de lo que entendemos por una explicación.*

Otros científicos se burlan a veces de los físicos de partículas elementales porque ahora existen tantas partículas pseudoelementales que tenemos que llevar el folleto de Berkeley con nosotros para recordar todas las partículas que han sido descubiertas. Pero el simple número de partículas no es importante. Como ha dicho Abdus Salam: «No es en partículas o fuerzas en lo que la naturaleza debe ahorrar, sino en principios». Lo importante es disponer de un conjunto de principios simples y económicos que explique por qué las partículas son las que son. Resulta desconcertante que no tengamos aún una teoría completa del tipo

que deseamos. Pero, cuando la tengamos, no importará mucho cuántos tipos de partículas o fuerzas describa, siempre que lo haga de una forma bella como una inevitable consecuencia de principios simples.

La clase de belleza que descubrimos en las teorías físicas es de un tipo muy limitado. Es, hasta donde he sido capaz de expresar con palabras, la belleza de la simplicidad y de la inevitabilidad: la belleza de la estructura perfecta, la belleza de que todo encaja, de que nada puede cambiar, de la rigidez lógica. Es una belleza sobria y clásica, como la que encontramos en las tragedias griegas. Pero éste no es el único tipo de belleza que hallamos en las artes. Una obra de Shakespeare no tiene esta belleza, al menos no en el grado que la tienen algunos de sus sonetos. Es frecuente que el director de una obra de Shakespeare decida cortar párrafos enteros. En la versión cinematográfica de *Hamlet* de Olivier, Hamlet nunca dice: «¡Oh, qué miserable, qué abyecto esclavo soy...!». Y, pese a todo, la representación funciona, porque las obras de Shakespeare no son estructuras sobrias y perfectas como la relatividad general o el *Edipo rey*, son grandes composiciones abigarradas cuya confusión refleja la complejidad de la vida. Esto forma parte de la belleza de sus obras, una belleza que para mi gusto es superior a la belleza de una obra de Sófocles, o a la belleza de la relatividad general para nuestro caso. Algunos de los más grandes momentos en Shakespeare son aquéllos en que deliberadamente abandona el modelo de la tragedia griega e introduce un exótico cómico proletario, un portero, o un jardinero, o un vendedor de higos, o un



sepulturero, inmediatamente antes de que sus personajes principales encuentren sus destinos. A decir verdad, la belleza de la física teórica sería un mal ejemplo para las artes, pero tal como es, nos proporciona placer y guía.

También en otro aspecto me parece que la física teórica es un mal modelo para las artes. Nuestras teorías son muy esotéricas; necesariamente lo son porque estamos obligados a desarrollar estas teorías utilizando un lenguaje, el lenguaje de la matemática, que no se ha convertido en parte de la cultura general del público educado. A los físicos generalmente nos disgusta el hecho de que nuestras teorías resulten tan esotéricas. Por el contrario, he oído en ocasiones a artistas que hablaban orgullosamente de que su trabajo sólo es accesible a un puñado de eruditos y justifican esta actitud citando el ejemplo de algunas teorías físicas, como la relatividad general, que también pueden ser entendidas sólo por los iniciados. Puede que los artistas, como los físicos, no sean siempre capaces de hacerse entender por el gran público, pero el esoterismo por el esoterismo es simplemente estúpido.

Aunque buscamos teorías que sean bellas debido a una rigidez impuesta en ellas por principios subyacentes simples, ello no significa que crear una teoría consista simplemente en deducirla matemáticamente de un conjunto de principios dados de antemano. Nuestros principios son a menudo inventados sobre la marcha, a veces precisamente porque conducen al tipo de rigidez que esperamos. No tengo duda de que una de las razones por la que Einstein estaba tan satisfecho con su idea de la equivalencia entre

gravitación e inercia era que este principio le llevaba a una única teoría bastante rígida de la gravitación y no a una variedad infinita de posibles teorías de la gravitación. Deducir las consecuencias de un conjunto dado de principios físicos bien formulados puede ser fácil o difícil, pero es el tipo de cosas que los físicos aprenden a hacer en las facultades universitarias y que, generalmente, disfrutan haciendo. La creación de *nuevos* principios físicos es lucha y aparentemente no puede ser enseñada.

De forma extraña e inquietante, aunque la belleza de las teorías físicas está incorporada en estructuras matemáticas rígidas basadas en principios subyacentes simples, las estructuras que tienen este tipo de belleza tienden a sobrevivir incluso cuando se descubre que los principios subyacentes están equivocados. Un buen ejemplo es la teoría de Dirac del electrón. Dirac estaba tratando en 1928 de reformular la versión de Schrödinger de la mecánica cuántica en términos de ondas de partículas que fueran compatibles con la teoría de la relatividad especial. Este intento llevó a Dirac a la conclusión de que el electrón debe tener un cierto espín, y que el universo está lleno de electrones inobservables de energía negativa cuya *ausencia* en un punto particular se manifestaría en el laboratorio como presencia de un electrón con carga opuesta, es decir, una antipartícula del electrón. Su teoría alcanzó un prestigio enorme a partir del descubrimiento en 1932 en los rayos cósmicos de esa precisa antipartícula del electrón, la partícula ahora denominada positrón. La teoría de Dirac era un ingrediente clave en la versión de la electrodinámica cuántica, que fue desarrollada y

aplicada con gran éxito en los años treinta y cuarenta. Pero hoy sabemos que el punto de vista de Dirac era básicamente equivocado. El contexto apropiado para la reconciliación de la mecánica cuántica y la relatividad especial no es el tipo de versión relativista de la mecánica ondulatoria de Schrödinger que Dirac buscaba, sino el formalismo más general conocido como teoría cuántica de campos, presentada por Heisenberg y Pauli en 1929. En la teoría cuántica de campos el fotón no es sólo un paquete de energía de un campo, el campo electromagnético; también los electrones y positrones son paquetes de energía del campo electrónico, y lo das las demás partículas elementales son paquetes de energía de otros varios campos. Casi por accidente, la teoría de Dirac del electrón daba los mismos resultados que la teoría cuántica de campos para procesos que involucran sólo electrones, positrones y/o fotones. Pero la teoría cuántica de campos es más general: puede dar cuenta de procesos, como la desintegración beta en los núcleos, que no podrían ser entendidos según las líneas de la teoría de Dirac<sup>80</sup>. No hay nada en la teoría cuántica de campos que requiera que las partículas tengan un espín concreto. El electrón resulta tener el espín que la teoría de Dirac requería, pero existen otras partículas con otros espines que, a su vez, tienen antipartículas y esto no tiene nada que ver con las energías

---

<sup>80</sup> En la teoría de Dirac los electrones son eternos; un proceso como lo producción de un electrón y un positrón se interpreta como el ascenso del electrón de energía negativa a un estado de energía positiva, dejando un hueco en el mar de electrones de energía negativa que es observado como un positrón, y la aniquilación de un electrón y un positrón se interpreta como la caída de un electrón en un hueco. En la desintegración nuclear beta se crean electrones *sin positrones* a partir de la energía y la carga eléctrica en el campo electrónico.

negativas sobre las que especuló Dirac<sup>81</sup>. Pese a todo, las *matemáticas* de la teoría de Dirac han sobrevivido como una parte esencial de la teoría cuántica de campos; debe enseñarse en todos los seminarios de mecánica cuántica avanzada. De este modo, la estructura formal de la teoría de Dirac ha sobrevivido a la muerte de los principios de la mecánica ondulatoria relativista que siguió Dirac para llegar a su teoría.

Así pues, las estructuras matemáticas que desarrollan los físicos obedeciendo a principios físicos tienen un singular tipo de transportabilidad. Pueden ser trasladadas de un marco conceptual a otro y servir a muchos propósitos diferentes, como sucede con las clavículas de los hombros que en otro animal serían la articulación entre el ala y el cuerpo de un pájaro o la aleta y el cuerpo de un delfín. Estamos abocados a estas bellas estructuras por los principios físicos, pero a veces la belleza sobrevive cuando los principios físicos no lo hacen.

Una posible explicación fue dada por Niels Bohr. Especulando en 1922 sobre el futuro de su primitiva teoría de la estructura atómica comentaba que «la matemática tiene sólo un número limitado de formas que podemos adaptar a la naturaleza, y puede sucederle a uno que encuentre las formas correctas formulando conceptos completamente erróneos<sup>82</sup>». Tal como sucedió, Bohr estaba en lo

---

<sup>81</sup> Dirac y yo participamos en una conferencia en Florida a comienzos de los años setenta y tuve la ocasión de preguntarle cómo podía explicar el hecho de que existan partículas (como el mesón pi o la partícula W) que tienen un espín diferente al del electrón y no pueden tener estados estables de energía negativa, pese a lo cual tienen antipartículas distintas. Dirac dijo que él nunca había pensado que estas partículas fueran importantes.

<sup>82</sup> Esto es una rememoración de Heisenberg, citada por Valentin Telegdi y Victor Weisskopf en una reseña de las obras completas de Heisenberg en *Physics Today*. La misma idea de la

cierto sobre el futuro de su propia teoría; sus principios subyacentes han sido abandonados, pero aún utilizamos algo de su lenguaje y métodos de cálculo.

Precisamente en la aplicación de la matemática pura a la física es donde la efectividad de los juicios estéticos resulta más sorprendente. Ha llegado a ser un lugar común el que los matemáticos estén impulsados en su trabajo por el deseo de construir formalismos que sean conceptualmente bellos. El matemático inglés G. H. Hardy explicaba que «las estructuras matemáticas, como las de los pintores o los poetas, deben ser bellas. Las ideas, como los colores o las palabras, deben encajar en una forma armoniosa. La belleza es el primer test. No hay lugar permanente para las matemáticas feas<sup>83</sup>». Y, pese a todo, se encuentra con frecuencia que las estructuras matemáticas que confesadamente desarrollan los matemáticos en busca de un tipo de belleza son, a la postre, extraordinariamente valiosas para el físico.

A modo de ilustración, volvamos al ejemplo de la geometría no euclidiana y la relatividad general. Después de Euclides, los matemáticos trataron de aprender durante dos milenios si las diferentes hipótesis subyacentes en la geometría de Euclides eran lógicamente independientes unas de otras. Si los postulados no fueran independientes, si alguno de ellos pudiera ser deducido de

---

variedad limitada de formas matemáticamente posibles ha sido expresada por el matemático Andrew Gleason.

<sup>83</sup> A lo largo de toda su vida Hardy pensó que su investigación en matemáticas puras posiblemente no iba a tener ninguna aplicación práctica. Pero cuando Kerson Huang y yo estábamos trabajando en el MIT sobre el comportamiento de la materia a temperaturas extremadamente altas, encontramos precisamente las fórmulas matemáticas que necesitábamos en los artículos de Hardy y Ramanujan sobre la teoría de los números.

los otros, entonces los postulados innecesarios podrían ser abandonados, dando lugar a una formulación de la geometría más económica y, por consiguiente, más bella. Este esfuerzo alcanzó su culminación en los primeros años del siglo XIX cuando «el príncipe de los geómetras», Carl Friedrich Gauss, y otros<sup>84</sup> desarrollaron una geometría no euclidiana para un tipo de espacio curvo que satisfacía todos los postulados de Euclides excepto el quinto<sup>85</sup>. Esto demostraba que el quinto postulado de Euclides es en realidad lógicamente independiente de los otros postulados. La nueva geometría fue desarrollada para dilucidar una cuestión histórica sobre los fundamentos de la geometría, no porque alguien pensara que fuese aplicable al mundo real.

La geometría no euclidiana fue posteriormente extendida por uno de los más grandes de todos los matemáticos, Georg Friedrich Bernhard Riemann, a una teoría general de los espacios curvos de dos, tres o cualquier número de dimensiones. Los matemáticos continuaron trabajando en la geometría riemanniana porque era muy bella, sin tener ninguna idea de sus aplicaciones físicas. Su belleza era de nuevo esencialmente la belleza de la inevitabilidad. Una vez que uno empieza a pensar sobre los espacios curvos se ve llevado casi inevitablemente a la introducción de los conceptos

---

<sup>84</sup> Los otros arquitectos principales de este espacio curvo fueron Janos Bolyai y Nicolai Ivanovitch Lobachevski. La obra de Gauss, Bolyai y Lobachevski fue importante para el futuro de las matemáticas, porque no se limitaron a describir la curvatura del espacio como se describe la curvatura de la superficie terrestre, diciendo que la superficie está inmersa en un espacio no curvado de más dimensiones, sino que lo hicieron en términos de su curvatura intrínseca, sin ninguna referencia a su inmersión en más dimensiones.

<sup>85</sup> Una versión del quinto postulado de Euclides afirma que por cualquier punto exterior a una recta dada puede trazarse una paralela y sólo una a dicha recta. En la nueva geometría no euclidiana de Gauss, Bolyai y Lobachevski por un punto pueden trazarse muchas líneas paralelas.

matemáticos («métrica», «conexiones afines», «tensores de curvatura», y demás) que son los ingredientes de la geometría riemanniana. Cuando Einstein comenzó a desarrollar la relatividad general se dio cuenta de que una manera de expresar sus ideas acerca de la simetría que relaciona diferentes sistemas de referencia era atribuir la gravitación a la curvatura del espacio-tiempo. Preguntó a un amigo, Marcel Grossman, si existía alguna teoría matemática de los espacios curvos; no meramente de las superficies bidimensionales curvas en el espacio euclidiano ordinario tridimensional, sino de los espacios curvos tridimensionales, e incluso espacios-tiempos curvos tetradimensionales. Grossman dio a Einstein la buena noticia de que realmente existía tal formalismo matemático, aquel desarrollado por Riemann y otros, y le enseñó estas matemáticas que Einstein incorporó a continuación en la relatividad general. Las matemáticas estaban allí esperando a que Einstein hiciera uso de ellas, aunque creo que Gauss y Riemann y los demás geómetras diferenciales del siglo XIX no tenían ninguna idea de que su trabajo pudiera ser alguna vez de aplicación en las teorías físicas de la gravitación.

Un ejemplo aún más extraño lo proporciona la historia de los principios de simetría interna. En física, los principios de simetría interna típicamente imponen un tipo de estructura de familia en la lista de las partículas posibles. El primer ejemplo conocido de una familia semejante fue proporcionado por los dos tipos de partículas que constituyen los núcleos atómicos ordinarios, el protón y el neutrón. Protones y neutrones tienen muy aproximadamente la

misma masa, de modo que, una vez que el neutrón fue descubierto por James Chadwick en 1932, era natural suponer que las fuerzas nucleares fuertes (que contribuyen a las masas del neutrón y del protón) deberían respetar una simetría sencilla: las ecuaciones que gobiernan estas fuerzas deberían conservar su forma si los papeles de neutrones y protones fueran intercambiados siempre que aparecieran en estas ecuaciones. Esto nos diría entre otras cosas que la fuerza nuclear fuerte entre dos neutrones es la misma que entre dos protones, pero no nos diría nada sobre la fuerza entre un protón y un neutrón. Causó así una cierta sorpresa el que los experimentos en 1936 revelaran que la fuerza nuclear entre dos protones es aproximadamente la misma que la fuerza entre un protón y un neutrón<sup>86</sup>. Esta observación dio lugar a la idea de una simetría que va más allá de los meros intercambios de protones y neutrones, una simetría bajo transformaciones continuas que cambian los protones y los neutrones en partículas que son combinaciones protón-neutrón con probabilidades arbitrarias de ser un protón o un neutrón.

Estas transformaciones de simetría actúan sobre la etiqueta de las partículas que distingue protones y neutrones de un modo que es matemáticamente equivalente a la forma en que las rotaciones ordinarias en tres dimensiones actúan sobre los espines de las partículas como protones, neutrones o electrones<sup>87</sup>. Con este

---

<sup>86</sup> Estos experimentos fueron llevados a cabo por Merle Tuve junto con N. Heydenberg y L. R. Hafstad, utilizando un acelerador de Van de Graff de un millón de voltios para disparar un haz de protones contra un blanco rico en protones como es la parafina.

<sup>87</sup> Por esta razón, esta simetría se conoce como *simetría de espín isotópico*. (Fue propuesta en 1936 por G. Breit y E. Feenberg, e independientemente por B. Cassen y E. U. Condon,



ejemplo en mente, hasta los años sesenta muchos físicos supusieron tácitamente que las transformaciones de simetría interna que dejan invariables las leyes de la naturaleza tenían que tomar la forma de rotaciones en un cierto espacio interno de dos, tres o más dimensiones, como las rotaciones de protones y neutrones de uno a otro. Los libros de texto entonces disponibles sobre la aplicación de los principios de simetría a la física (incluyendo los libros clásicos de Hermann Weyl y Eugene Wigner) apenas daban ninguna indicación de que hubiera otras posibilidades matemáticas. Sólo cuando fue descubierto un grupo de nuevas partículas en los rayos cósmicos y, a continuación, en aceleradores como el Bevatrón en Berkeley a finales de los años cincuenta, una concepción más amplia de las posibilidades de las simetrías internas fue introducida en el mundo de la física teórica. Estas partículas parecían pertenecer a familias más extensas que el simple par de gemelos protón-neutrón. Por ejemplo, se encontró que el neutrón y el protón tenían una fuerte afinidad familiar con seis nuevas partículas conocidas como hiperones, con el mismo espín y masa similar. ¿Qué tipo de simetría interna podía dar lugar a estos

---

basándose en los experimentos de Tuve *et al.*). La simetría de espín isotópico también es matemáticamente similar a la simetría interna que subyace en las fuerzas débil y electromagnética en la teoría electrodébil, aunque físicamente es bastante diferente. Una diferencia es que diferentes partículas se agrupan en familias: el protón y el neutrón para la simetría de espín isotópico, y el electrón y el neutrino zurdos tanto como los quarks *up* (arriba) y *down* (abajo) zurdos para la simetría electrodébil. La simetría electrodébil afirma también la invariancia de las leyes de la naturaleza bajo transformaciones que pueden depender de la posición en el espacio y el tiempo; las ecuaciones que gobiernan la física nuclear conservan su forma sólo si transformamos mutuamente los protones y los neutrones de la misma forma en todo lugar y en todo instante. Finalmente, la simetría de espín isotópico es sólo aproximada y hoy día se entiende como una consecuencia accidental de las pequeñas masas de los quarks en nuestra moderna teoría de las fuerzas nucleares fuertes; la simetría electrodébil es exacta y se considera un principio fundamental en la teoría electrodébil.

extensos grupos de parentesco?

Alrededor de 1960 los físicos que estudiaban esta cuestión empezaron a buscar ayuda en la literatura matemática. Para ellos fue una deliciosa sorpresa el descubrir que los matemáticos ya habían catalogado en cierto sentido todas las simetrías posibles. El conjunto completo de transformaciones que deja inalterada cualquier cosa, ya sea un objeto específico o las leyes de la naturaleza, constituye una estructura matemática conocida como *grupo*<sup>88</sup>, y la matemática general de las transformaciones de simetría es conocida como *teoría de grupos*. Cada grupo está caracterizado por reglas matemáticas abstractas que no dependen de qué es lo que se transforma, del mismo modo que las reglas de la aritmética no dependen de qué es lo que estamos sumando o multiplicando. La lista de los tipos de familias que están permitidas por cualquier simetría particular de las leyes de la naturaleza está completamente determinada por la estructura matemática del grupo de simetría.

Los grupos de transformaciones que actúan de forma continua, como las rotaciones en el espacio ordinario o la combinación de electrones y neutrinos en la teoría electrodébil, se denominan *grupos de Lie*, nombre debido al matemático noruego Sophus Lie. El matemático francés Élie Cartan había dado en su tesis de 1894 una

---

<sup>88</sup> Si dos transformaciones dejan algo invariante también lo hace su «producto», que se define como la realización de una transformación seguida de la otra. Si una transformación deja algo invariante, también lo hace su inversa, la transformación que deshace la primera. Además, existe siempre una transformación que deja todo invariante, la transformación que no hace nada en absoluto y que se conoce como transformación unidad debido a que actúa como la multiplicación por el número uno. Estas tres propiedades son lo que constituye a un conjunto de operaciones como grupo.

lista de todos los grupos de Lie «simples», a partir de los cuales pueden construirse todos los demás combinando sus transformaciones<sup>89</sup>. En 1960, Gell-Mann y el físico israelí Yuval Ne'eman descubrieron independientemente que uno de estos grupos de Lie simples —conocido como  $SU(3)$ — era exactamente el que se precisaba para imponer a la multitud de partículas elementales una estructura de familias similar a la que se había descubierto experimentalmente. Gell-Mann tomó prestado un término del budismo y llamó a esta simetría principio del óctuple sendero, debido a que las partículas mejor conocidas se distribuían en familias con ocho miembros, como el neutrón, el protón y sus seis hermanos. No todas las familias estaban entonces completas; se necesitaba una nueva partícula para completar una familia de diez partículas que son similares a los neutrones, protones e hiperones, pero tienen un espín tres veces mayor. Uno de los grandes éxitos de la nueva simetría  $SU(3)$  lo constituyó el que esta partícula predicha fue descubierta subsiguientemente en 1964 en Brookhaven<sup>90</sup> y resultó tener la masa estimada por Gell-Mann.

Sin embargo, esta teoría de grupos que resultó tener tanta relevancia para la física había sido inventada por los matemáticos por razones que eran estrictamente internas a la matemática. La teoría de grupos fue iniciada a comienzos del siglo XIX por Evariste Galois, en su demostración de que no existen fórmulas generales

---

<sup>89</sup> Brevemente, existen tres categorías infinitas de grupos de Lie simples: los familiares grupos de rotación en dos, tres o más dimensiones, y otras dos categorías de transformaciones similares a rotaciones, conocidas como la transformación unitaria y la simpléctica. Además, existen solamente cinco grupos de Lie «excepcionales» que no pertenecen a ninguna de estas categorías.

<sup>90</sup> Por un grupo encabezado por N. Samios.

para la solución de ciertas ecuaciones algebraicas (ecuaciones que involucran potencias quintas o superiores de la incógnita<sup>91</sup>). Ni Galois, ni Lie, ni Cartan tenían idea del tipo de aplicación que la teoría de grupos iba a tener en física.

Es muy extraño que los matemáticos se vean llevados por su sentido de la belleza matemática a desarrollar estructuras formales que sólo más tarde los físicos encuentran útiles, incluso si los matemáticos no habían tenido tal objetivo en mente. Un ensayo bien conocido del físico Eugene Wigner se refiere a este fenómeno como «la irrazonable efectividad de la matemática<sup>lii</sup>». Los físicos generalmente encuentran bastante misteriosa la capacidad de los matemáticos para anticipar las matemáticas necesarias para las teorías de los físicos. Es como si Neil Armstrong en 1969, cuando pisó por primera vez la superficie de la Luna, hubiera encontrado en el polvo lunar las huellas de Julio Verne.

¿De dónde *saca* entonces un físico un sentido de la belleza que ayuda no sólo a descubrir teorías del mundo real, sino incluso a juzgar la validez de teorías físicas, a veces frente a evidencia experimental en contra? ¿Y cómo el sentido de la belleza de un matemático conduce a estructuras que son valiosas a los físicos décadas o siglos más tarde, incluso aunque el matemático pueda no tener ningún interés en las aplicaciones físicas?

Creo que hay tres explicaciones plausibles para esto, dos de ellas aplicables a casi toda la ciencia y la tercera limitada a las áreas más fundamentales de la física. La primera explicación es que el propio

---

<sup>91</sup> El grupo en cuestión en la obra de Galois era el conjunto de permutaciones de las soluciones de la ecuación.

universo actúa sobre nosotros como una aleatoria, ineficiente y, pese a todo, efectiva a largo plazo máquina de enseñanza. De la misma forma que a través de una serie infinita de sucesos accidentales los átomos de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno se unieron para constituir formas primitivas de vida que posteriormente evolucionaron hacia los protozoos, los peces y los hombres, también nuestro modo de ver el universo ha evolucionado gradualmente a través de una selección natural de ideas. Después de innumerables salidas falsas, se nos ha llegado a moldear la idea de que la naturaleza es de una cierta forma y hemos llegado a considerar que dicha forma es bella.

Supongo que ésta sería la explicación que daría cualquiera al hecho de por qué el sentido de la belleza del preparador de caballos le ayuda, cuando lo hace, a juzgar qué caballo puede ganar carreras. El preparador de un caballo de carreras ha estado tras la pista durante muchos años, ha tenido la experiencia de muchos caballos ganadores o perdedores y ha llegado a asociar, sin ser capaz de expresarlo explícitamente, ciertos indicios visuales con la expectativa de un caballo ganador.

Una de las cosas que hace la historia de la ciencia tan fascinante es seguir la lenta educación de nuestra especie en el tipo de belleza que hay que esperar en la naturaleza. En cierta ocasión repasé la literatura original de los años treinta sobre el más antiguo de los principios de simetría interna en la física nuclear, la simetría que he mencionado antes entre neutrones y protones, para tratar de encontrar el artículo de investigación que expuso por primera vez

este principio de simetría en la forma que lo exponemos hoy, como un hecho fundamental sobre la física nuclear que se sostiene por sí mismo, independiente de cualquier teoría detallada de las fuerzas nucleares. No pude encontrar tal artículo. Parece que en los años treinta sencillamente no se acostumbraba a escribir artículos basados en los principios de simetría. Lo que se llevaba era escribir artículos sobre fuerzas nucleares. Si las fuerzas resultaban tener una cierta simetría, tanto mejor, pues si usted conocía la fuerza protón-neutrón no tenía que conjeturar la fuerza protón-protón. Pero el propio principio de simetría no era considerado, por lo que puedo decir, como una característica que diera legitimidad a una teoría, que hiciera la teoría bella. Los principios de simetría eran considerados como trucos matemáticos; la tarea real de la física era calcular los detalles dinámicos de las fuerzas que observamos.

Hoy día vemos las cosas de forma muy diferente. Si los experimentadores llegaran a descubrir algunas partículas nuevas que formaran familias de un tipo u otro como el doblete protón-neutrón, entonces el correo se llenaría instantáneamente con cientos de borradores de artículos teóricos especulando sobre el tipo de simetría que subyace en la estructura de esta familia; y, si un nuevo tipo de fuerza fuera descubierto, todos empezaríamos a especular sobre la simetría que dicta la existencia de esta fuerza. Evidentemente hemos sido cambiados por el universo que actúa como una máquina de enseñanza y nos impone un sentido de belleza con el que nuestra especie no había nacido.

Incluso los matemáticos viven en el universo real y responden a sus

lecciones. La geometría de Euclides fue enseñada a los niños en la escuela durante dos milenios como un ejemplo casi perfecto de razonamiento deductivo abstracto, pero en este siglo hemos aprendido de la relatividad general que la geometría euclidiana funciona tan bien como lo hace porque el campo gravitatorio en la superficie de la Tierra es bastante débil y, por ello, el espacio en el que vivimos no tiene una curvatura notable. Al formular sus postulados, Euclides estaba actuando realmente como un físico, utilizando su experiencia mundana en los débiles campos gravitatorios de la Alejandría helenística para hacer una teoría del espacio no curvo. Él no sabía hasta qué punto era limitada y contingente su geometría. En realidad, sólo en tiempos relativamente recientes hemos aprendido a hacer una distinción entre la matemática pura y la ciencia a la que se aplica. La cátedra lucasiana de Cambridge que fue desempeñada por Newton y Dirac era (y aún es) oficialmente un profesorado en matemáticas, no en física. Sólo con el desarrollo de un estilo matemático riguroso y abstracto por Augustin-Louis Cauchy y otros a comienzos del siglo XIX, los matemáticos adoptaron como ideal que su trabajo debería ser independiente de la experiencia y el sentido común<sup>liii</sup>.

La segunda de las razones por las que esperamos que las teorías científicas correctas sean bellas es simplemente que los científicos tienden a elegir problemas que probablemente van a tener bellas soluciones. Lo mismo puede aplicarse incluso a nuestro amigo el preparador de caballos de carreras. Él entrena caballos para ganar carreras; ha aprendido a reconocer qué caballos tienen posibilidades

de ganar y él llama bellos a estos caballos; pero, si usted le lleva aparte y le promete no repetir lo que diga, él podrá confesarle que la razón que le llevó a entrar en el negocio de preparar caballos para ganar carreras fue inicialmente que los caballos que él preparaba son animales muy bellos.

Un buen ejemplo en física lo proporciona el fenómeno de las transiciones de fase suaves<sup>92</sup>, como la desaparición espontánea de la magnetización cuando un imán permanente de hierro se calienta hasta una temperatura por encima de los 770 °C, la temperatura conocida como punto de Curie. Puesto que ésta es una transición continua, la magnetización de un trozo de hierro tiende a cero gradualmente a medida que la temperatura se aproxima al punto de Curie. Lo sorprendente en semejantes transiciones de fase es la *forma* en que la magnetización tiende a cero. Estimaciones de las diversas energías en un imán habían llevado a los físicos a esperar que, cuando la temperatura está sólo ligeramente por debajo del punto de Curie, la magnetización sería simplemente proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia entre el punto de Curie y la temperatura. En lugar de ello se observó experimentalmente que la magnetización es proporcional a la potencia 0,37 de esta diferencia. Es decir, la dependencia de la magnetización con la temperatura está entre ser proporcional a la raíz cuadrada (la potencia 0,5) y a la

---

<sup>92</sup> Las que llamo transiciones de fase «suaves» se denominan también con frecuencia «transiciones de fase de segundo orden». Se hace esto para distinguirlas de las «transiciones de fase de primer orden», como la ebullición del agua a 100 °C o la fusión del hielo a 0 °C, en las que las propiedades del material cambian de forma discontinua. Se necesita una cierta cantidad de energía (el llamado calor latente) para convertir hielo a 0 °C en agua líquida a la misma temperatura, o agua líquida a 100 °C en vapor de agua a la misma temperatura, pero no se necesita energía extra para hacer desaparecer el magnetismo de un trozo de hierro cuando la temperatura alcanza precisamente el punto de Curie.



raíz cúbica (la potencia 0,33) de la diferencia entre el punto de Curie y la temperatura.

Potencias como este 0,37 se denominan *exponentes críticos*, a veces con el adjetivo «no clásicos» o «anómalos», porque no son los que se hubiera esperado. Se han observado otras cantidades que se comportan de forma similar en esta y otras transiciones de fase, en algunos casos con exactamente el mismo exponente crítico. Éste no es un fenómeno intrínsecamente atractivo, como los agujeros negros o la expansión del universo. Sin embargo, algunos de los físicos teóricos más brillantes de todo el mundo trabajaron en el problema de los exponentes críticos hasta que dicho problema fue finalmente resuelto en 1972 por Kennett Wilson y Michael Fisher, entonces ambos en Cornell. Pese a todo, podría haberse pensado que el cálculo exacto del propio punto de Curie era un problema de mayor importancia práctica. ¿Por qué deberían los principales teóricos de la materia condensada dar una prioridad mucho mayor al problema de los exponentes críticos?

Creo que el problema de los exponentes críticos atrajo tanta atención porque los físicos estimaban que sería probable obtener una bella solución. Las claves que sugerían que la solución sería bella consistían sobre todo en la universalidad del fenómeno, el hecho de que los mismos exponentes críticos se obtenían en problemas muy diferentes, y también el hecho de que los físicos se habían acostumbrado a descubrir que las propiedades más esenciales de los fenómenos físicos se expresan a menudo como leyes que relacionan magnitudes físicas con potencias de otras

magnitudes, tales como la ley de la inversa del cuadrado en la gravitación. Tal como resultó, la teoría de los exponentes críticos tiene una simplicidad e inevitabilidad que la convierte en una de las teorías más bellas de toda la física. Por el contrario, el problema de calcular las temperaturas exactas de las transiciones de fase es algo confuso, cuya solución involucra detalles complicados del hierro u otras sustancias que sufren la transición de fase, y por esta razón se estudia o bien por su importancia práctica o en espera de algo mejor que hacer.

En algunos casos, las esperanzas iniciales de los científicos en una bella teoría han resultado estar mal fundadas. Un buen ejemplo lo proporciona el código genético. Francis Crick describe en su autobiografía<sup>liv</sup> cómo tras el descubrimiento de la estructura de doble-hélice del ADN por él mismo y James Watson, la atención de los biólogos moleculares giró hacia el descifrado del código mediante el que la célula interpreta la secuencia de unidades químicas en las dos hélices del ADN como una receta para construir moléculas proteínicas apropiadas. Se sabía que las proteínas están formadas a partir de cadenas de aminoácidos, que existen sólo 20 aminoácidos que son importantes en prácticamente todas las plantas y animales, y que la información para seleccionar cada sucesivo aminoácido en una molécula proteínica está contenida en la elección de tres pares sucesivos de unidades químicas llamadas bases, de las que sólo hay cuatro tipos diferentes. De este modo, el código genético interpreta cada una de las tres elecciones sucesivas de entre cuatro pares de bases posibles (como tres cartas elegidas por orden de entre un

mazo de cartas que muestran sólo los cuatro palos, pero no números ni figuras) para dictar cada elección de uno de entre veinte posibles aminoácidos que debe ser añadido a la proteína. Los biólogos moleculares imaginaron todo tipo de principios elegantes que pudieran gobernar este código; por ejemplo, que ninguna información se debía desperdiciar en la elección de tres pares de bases, y que cualquier información no necesaria para especificar un aminoácido era utilizada para detectar errores, como los bits extra que se envían de un ordenador a otro para verificar la exactitud de la transmisión. La respuesta hallada a comienzos de los años sesenta resultó ser muy diferente. El código genético está bastante más embarullado; algunos aminoácidos son invocados por más de una tripleta de pares de bases, y algunas tripletas no producen absolutamente nada<sup>93</sup>. No se puede decir que el código genético sea malo, sino más bien que es un código escogido de forma aleatoria, lo que sugiere que ha sido algo mejorado por la evolución, aunque cualquier ingeniero de comunicaciones podría diseñar un código mejor. La razón, por supuesto, es que el código genético *no* fue diseñado; se desarrolló a través de una serie de accidentes al principio de la vida sobre la Tierra y ha sido heredado más o menos de esta forma por todos los organismos subsiguientes. Por supuesto, el código genético es tan importante para nosotros que lo estudiamos independientemente de que sea o no bello, pero es algo decepcionante que no resulte ser bello.

A veces, cuando nuestro sentido de la belleza falla es debido a que

---

<sup>93</sup> Estrictamente hablando, los tripletes sin significado (otro que éste) llevan el mensaje «fin de cadena».

hemos sobreestimado el carácter fundamental de lo que estamos tratando de explicar. Un ejemplo célebre es el trabajo del joven Johannes Kepler sobre las dimensiones de las órbitas planetarias.

Kepler tenía conocimiento de una de las más bellas conclusiones de la matemática griega, relativa a los denominados sólidos platónicos. Existen objetos tridimensionales con contornos planos para los que cada vértice, cada cara y cada arista son exactamente igual que todos los demás vértices, caras o aristas. Un ejemplo obvio es el cubo. Los griegos descubrieron que en total sólo existían cinco de estos sólidos platónicos: el cubo, la pirámide triangular (o tetraedro), el dodecaedro de doce caras, el octaedro de ocho caras y el icosaedro de veinte caras. (Se denominan sólidos platónicos debido a que Platón propuso en el *Timeo* una correspondencia unívoca entre ellos y los cinco supuestos elementos, una idea posteriormente atacada por Aristóteles). Los sólidos platónicos proporcionan un ejemplo primario de belleza matemática; este descubrimiento tiene el mismo tipo de belleza que el catálogo de Cartan de todos los posibles principios de simetría continua.

Kepler propuso en su *Mysterium cosmographicum* que la existencia de sólo cinco sólidos platónicos explicaba por qué existen sólo cinco planetas (además de la Tierra): Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. (Urano, Neptuno y Plutón no se descubrieron hasta más tarde). Kepler asoció a cada uno de estos cinco planetas uno de los sólidos platónicos, y formuló la hipótesis de que el radio de la órbita de cada planeta era proporcional al radio del correspondiente sólido platónico cuando los sólidos anidan unos dentro de otros en el

orden correcto. Kepler escribió que había trabajado sobre las irregularidades del movimiento planetario «hasta que finalmente fueron acomodadas a las leyes de la naturaleza<sup>lv</sup>».

Hoy día puede parecer escandaloso para un científico que uno de los fundadores de la ciencia moderna hubiera inventado un modelo tan fantástico del Sistema Solar. No se trata sólo de que el esquema de Kepler no se ajusta a las observaciones del Sistema Solar (que, por supuesto, no lo hace), sino mucho más, de que sabemos que éste no es el tipo de especulación que resulta apropiado para el Sistema Solar. Pero Kepler no era un loco. El tipo de razonamiento especulativo que aplicó al Sistema Solar es muy similar al tipo de teorización que los físicos de partículas elementales hacen hoy día; no asociamos nada a los sólidos platónicos, pero creemos, por ejemplo, en una correspondencia entre diferentes tipos de fuerza posibles y diferentes miembros del catálogo de Cartan de todas las simetrías posibles. Donde Kepler estaba equivocado no era en la utilización de este tipo de conjetura, sino en suponer (como la mayoría de los filósofos anteriores a él habían supuesto) que los planetas son importantes.

Por supuesto, los planetas son importantes en ciertas formas. Vivimos en uno de ellos, pero su existencia no está incorporada en un nivel fundamental en las leyes de la naturaleza. Entendemos ahora que los planetas y sus órbitas son el resultado de accidentes históricos y que, aunque la teoría física puede decirnos qué órbitas son estables y qué órbitas son caóticas, no existe ninguna razón para esperar alguna relación entre las dimensiones de sus órbitas

que fuese matemáticamente simple y bella.

Cuando estudiamos problemas verdaderamente fundamentales es cuando esperamos encontrar respuestas bellas. Creemos que si preguntamos por qué el mundo es como es, y luego preguntamos por qué la respuesta es la que es, al final de esta cadena de explicaciones encontraremos algunos principios simples de belleza irresistible. Pensamos que esto se debe en parte a que nuestra experiencia histórica nos enseña que cuando buscamos bajo la superficie de las cosas encontramos cada vez más belleza. Platón y los neoplatónicos enseñaban que la belleza que vemos en la naturaleza es un reflejo de la belleza de lo último, el *nous*. Para nosotros, también la belleza de las teorías actuales es una anticipación, una premonición de la belleza de la teoría final. Y, en cualquier caso, no aceptaríamos una teoría como final a menos que fuese bella.

Aunque todavía no tenemos una idea segura de si en nuestro trabajo podemos confiar en nuestro sentido de la belleza, en física de partículas elementales los juicios estéticos parecen estar trabajando cada vez mejor. Para mí esto es una evidencia de que nos movemos en la buena dirección y de que quizá no estamos demasiado lejos de nuestro objetivo.

## Capítulo 6

### Contra la filosofía

*Yo mismo en mi juventud frecuenté ávidamente a Doctores y Santos, y escuché grandes discusiones sobre esto y lo otro: pero siempre salí por la misma puerta que entré<sup>94</sup>.*

*EDWARD FITZGERALD, Rubáiyát of Omar Khayyám*

Tanta ayuda obtienen los físicos de los subjetivos, y a menudo vagos, juicios estéticos que sería de esperar que también recibieran ayuda de la filosofía, a partir de la cual, después de todo, evolucionó nuestra ciencia. ¿Puede la filosofía proporcionarnos alguna guía hacia la teoría final?

El valor actual que tiene la filosofía para la física me parece análogo al valor que tuvieron las primitivas ciudades-estado para sus pueblos. No es muy exagerado decir que, hasta la introducción del servicio de correos, el principal servicio de las ciudades-estado consistía en proteger a sus pueblos de otras ciudades-estado. Las intuiciones de los filósofos han beneficiado en ocasiones a los físicos, aunque generalmente mediante una actitud negativa: protegiéndoles de los prejuicios de otros filósofos.

---

<sup>94</sup> [Myself when young did eagerly frequent / Doctor and Saint, and heard great argument / About it and about: but evermore / Came out by the same door wherein I went].

No quiero aquí sacar la lección de que la física se hace mejor sin prejuicios. En cualquier momento hay tantas cosas que podrían hacerse, tantos principios aceptados que podrían ser puestos en duda que, sin alguna guía de nuestros prejuicios, no haríamos nada en absoluto. Lo que ocurre es que los principios filosóficos no nos han proporcionado, en general, los prejuicios correctos. En nuestra caza de una teoría final, los físicos se comportan más como sabuesos que como halcones; hemos llegado a ser buenos olfateando el suelo en busca de huellas de la belleza que esperamos en las leyes de la naturaleza, pero parece que no somos capaces de ver el camino de la verdad desde las alturas de la filosofía.

Por supuesto, los físicos llevan consigo una filosofía operativa. Para la mayoría de nosotros, esta filosofía es un crudo realismo, una creencia en la realidad objetiva de los ingredientes de nuestras teorías científicas. Pero esto ha sido aprendido a partir de la experiencia de la investigación científica y raramente de las enseñanzas de los filósofos.

Esto no supone negar todo valor a la filosofía, gran parte de la cual no tiene nada que ver con la ciencia<sup>95</sup>. Ni siquiera pretendo negar todo el valor a la filosofía de la ciencia, que en sus mejores momentos me parece una glosa agradable sobre la historia y los descubrimientos de la ciencia. Pero no deberíamos esperar que

---

<sup>95</sup> Dos amigos filósofos me han señalado que el título de este capítulo, «Contra la filosofía», es una exageración, porque yo no estoy argumentando contra la filosofía en general, sino contra los malos efectos que tienen en la ciencia doctrinas filosóficas como el positivismo y el relativismo. Estos amigos especulaban que yo propuse el título como una respuesta al libro de Feyerabend, *Contra el método*. En realidad, el título de este capítulo me lo sugirieron los títulos de un par de bien conocidos artículos de revisión sobre derecho: el «Against Settlement» de Owen Fiss, y el «Against Comity» de Louise Weinberg. En cualquier caso, no creo que «Contra el positivismo y el relativismo» fuese un título muy pegadizo.



proporcione a los científicos de hoy ninguna guía útil sobre cómo proceder en su trabajo o sobre lo que pueden llegar a descubrir.

Debo reconocer que esto también lo entienden muchos de los propios filósofos. Después de revisar tres décadas de escritos profesionales sobre filosofía de la ciencia, el filósofo George Gale concluye que «estas discusiones casi arcanas, rayanas en la escolástica, podrían haber interesado sólo al más pequeño número de científicos practicantes<sup>lvi</sup>». Wittgenstein comentaba que «nada me parece menos probable que el que un científico o matemático que me lea quede seriamente influenciado en su forma de trabajar<sup>lvii</sup>».

No se trata solamente de una cuestión de pereza intelectual de los científicos. Resulta angustioso tener que interrumpir el propio trabajo para aprender una nueva disciplina, pero los científicos lo hacen cuando tienen necesidad de hacerlo. En varias ocasiones he tenido que robar tiempo a lo que estaba haciendo para aprender todo tipo de cosas que necesitaba saber, desde topología diferencial hasta el DOS Microsoft. Se trata simplemente de que no me parece que sea útil para los físicos un conocimiento de la filosofía; siempre con la excepción del trabajo de algunos filósofos que nos ayuda a evitar los errores de otros filósofos.

Debo admitir sinceramente mis limitaciones y parcialidad al hacer tales juicios. Tras algunos años de infatuación con la filosofía, cuando yo era estudiante universitario, quedé desencantado. Las ideas de los filósofos que estudié me parecían oscuras e inconsecuentes comparadas con los deslumbrantes éxitos de la física y de la matemática. Desde entonces, de cuando en cuando he

tratado de leer los trabajos en curso sobre la filosofía de la ciencia. He encontrado que algunos de ellos están escritos en una jerga tan impenetrable que sólo puedo pensar que pretendían impresionar a aquellos que confunden la oscuridad con la profundidad<sup>lviii</sup>. Otra parte de estos trabajos constituían una buena, e incluso ingeniosa, lectura, como es el caso de los escritos de Wittgenstein y Paul Feyerabend. Pero sólo raramente me parecía que tuvieran algo que ver con el trabajo de la ciencia tal como yo lo conocía<sup>96</sup>. Según Feyerabend, la noción de explicación científica desarrollada por algunos filósofos de la ciencia es tan estrecha que resulta imposible decir que una teoría es explicada por otra, un punto de vista que dejaría a los físicos de partículas de mi generación sin nada que hacer<sup>lix</sup>.

Podría parecer al lector (especialmente si el lector es un filósofo profesional) que un científico que anda tan poco en sintonía con la filosofía de la ciencia como yo lo estoy debería pasar de puntillas sobre el tema y dejarlo a los expertos. Sé lo que sienten los filósofos a propósito de los intentos de los científicos en la filosofía *amateur*. Pero no pretendo aquí desempeñar el papel de un filósofo, sino más bien el de un espécimen, un impenitente científico en activo que no encuentra ninguna ayuda en la filosofía profesional. No estoy solo en esto; no conozco a *nadie* que haya participado activamente en el avance de la física en el período de posguerra cuya investigación

---

<sup>96</sup> Muchos otros científicos en activo reaccionan de la misma forma a los escritos de los filósofos. Por ejemplo, en su réplica al filósofo H. Kincaid que cité en el capítulo 3, el bioquímico J. D. Robinson comentaba que «los biólogos indudablemente cometen horribles pecados filosóficos. Y ellos deberían recibir con entusiasmo la ayuda instruida de los filósofos. Sin embargo, dicha ayuda será más útil cuando los filósofos reconozcan lo que los biólogos se proponen y lo que los biólogos hacen».

haya recibido ninguna ayuda significativa del trabajo de los filósofos. En el capítulo anterior planteé el problema de lo que Wigner llama «irrazonable efectividad» de la matemática; aquí quiero considerar otro fenómeno igualmente enigmático: la irrazonable inefectividad de la filosofía.

Incluso allí donde las doctrinas filosóficas han sido útiles en el pasado a los científicos, se han perpetuado durante demasiado tiempo y al final han supuesto una molestia mayor incluso que la utilidad que tuvieron en su día. Tomemos por ejemplo la venerable doctrina del «mecanicismo», la idea de que la naturaleza actúa a través de tracciones y empujes sobre las partículas materiales o los fluidos. En el mundo antiguo ninguna doctrina podría haber sido más progresista. Desde que los filósofos presocráticos Demócrito y Leucipo comenzaron a especular sobre los átomos, la idea de que los fenómenos naturales tienen causas mecánicas se ha enfrentado siempre a las creencias populares en dioses y demonios. El líder del culto helenístico Epicuro introdujo una concepción mecanicista en su credo específicamente como un antídoto para la creencia en los dioses olímpicos. Cuando René Descartes se planteó hacia 1630 su gran intento para comprender el mundo en términos racionales era natural que describiera las fuerzas físicas como la gravitación de una forma mecánica, en términos de vórtices en un fluido material que llena todo el espacio. La «filosofía mecanicista» de Descartes tuvo una poderosa influencia en Newton, no porque fuera correcta (Descartes no parecía tener la idea moderna de verificar las teorías cuantitativamente), sino porque proporcionaba un ejemplo del tipo

de teoría mecanicista que podría dar sentido a la naturaleza. El mecanicismo alcanzó su apogeo en el siglo XIX con la brillante explicación de la química y el calor en términos de átomos. E incluso hoy día, el mecanicismo les parece a muchos simplemente el opuesto lógico de la superstición. En la historia del pensamiento humano la concepción mecanicista ha tenido un papel heroico.

Precisamente éste es el problema. En ciencia, como en política o economía, corremos gran peligro con las ideas heroicas que han sobrevivido a su utilidad. El pasado heroico del mecanicismo le ganó tal prestigio que los seguidores de Descartes tuvieron problemas para aceptar la teoría de Newton del Sistema Solar. ¿Cómo podría un buen cartesiano, creyendo que todos los fenómenos naturales podían reducirse al impacto mutuo de cuerpos materiales o de fluidos, aceptar la idea de Newton de que el Sol ejerce una fuerza sobre la Tierra a través de ciento cincuenta millones de kilómetros de espacio vacío? Sólo en el siglo XVIII los filósofos continentales empezaron a sentirse cómodos con la idea de una acción a distancia. Al final, las ideas de Newton prevalecieron en el continente tanto como en Gran Bretaña; en Holanda, Italia, Francia y Alemania (en ese orden) se impusieron a partir de 1720<sup>lx</sup>. Ciertamente, esto fue debido en parte a la influencia de filósofos como Voltaire y Kant, pero aquí, una vez más, el servicio de la filosofía fue negativo; ayudó sólo a liberar a la ciencia de las restricciones de la propia filosofía.

Incluso tras el triunfo del newtonismo, la tradición mecanicista continuó floreciendo en la física. Las teorías de los campos eléctrico

y magnético desarrolladas en el siglo XIX por Michael Faraday y James Clerk Maxwell estaban expresadas en un marco mecanicista, en términos de tensiones en el seno de un medio físico penetrante, con frecuencia llamado éter. Los físicos del siglo XIX no se estaban comportando de forma alocada; todos los físicos necesitan algún tipo de concepción del mundo provisional para hacer progresos, y la concepción mecanicista parecía un candidato tan bueno como cualquier otro. Pero sobrevivió demasiado tiempo.

La ruptura final con el mecanicismo en la teoría electromagnética habría de llegar en 1905, cuando la teoría de la relatividad especial de Einstein barrió en efecto el éter y en su lugar puso al espacio vacío como medio que transmite los impulsos electromagnéticos. Pero incluso entonces la concepción mecanicista siguió vigente entre una vieja generación de físicos, como el profesor Victor Jakob, protagonista de la novela de Russell McCormmach *Night Thoughts of a Classical Physicist*, que eran incapaces de asimilar las nuevas ideas<sup>lxi</sup>.

El mecanicismo también ha traspasado los límites de la ciencia y ha sobrevivido allí para, más tarde, causar problemas a los científicos. En el siglo XIX la heroica tradición del mecanicismo fue incorporada, de forma poco feliz, en el materialismo dialéctico de Marx y Engels y sus seguidores. Lenin, en el exilio en 1908, escribió un ampuloso libro sobre el materialismo y, aunque para él era principalmente un medio con el que atacar a otros revolucionarios, algunos cabos sueltos de su comentario fueron sacralizados por sus seguidores hasta el punto de que, durante cierto tiempo, el materialismo

dialéctico impidió la aceptación de la relatividad general en la Unión Soviética. Todavía en una fecha tan relativamente reciente como 1961, el distinguido físico ruso Vladimir Fock se sentía obligado a defenderse de la acusación de que se había apartado de la ortodoxia filosófica. El prefacio de su tratado «La teoría del espacio, el tiempo y la gravitación» contiene la notable afirmación: «el aspecto filosófico de nuestras ideas sobre la teoría del espacio, el tiempo y la gravitación se formó bajo la influencia de la filosofía del materialismo dialéctico, en particular bajo la influencia del materialismo de Lenin y la crítica empírica».

Nada en la historia de la ciencia es siempre sencillo. Aunque después de Einstein no había lugar en la investigación científica seria para la vieja e ingenua concepción mecanicista, algunos elementos de esta visión se conservaron en la física de la primera mitad del siglo xx. De un lado, existían las partículas materiales, como los electrones, protones y neutrones que constituyen la materia ordinaria. Del otro, existían campos, tales como los campos eléctrico, magnético y gravitatorio, que son producidos por las partículas y ejercen fuerzas sobre las partículas. Más adelante, en 1929, la física comenzó a girar hacia una concepción más unificada. Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli describieron a ambos, partículas y campos, como manifestaciones de un nivel de realidad más profundo, el nivel de los campos cuánticos. La mecánica cuántica ya había sido aplicada años antes a los campos eléctrico y magnético, y había sido utilizada para justificar la idea de Einstein de las partículas de luz, los fotones. Ahora, Heisenberg y Pauli

estaban suponiendo que no sólo los fotones sino todas las partículas son paquetes de energía de varios campos. En esta *teoría cuántica de campos*, los electrones son paquetes de energía del campo electrónico; los neutrinos son paquetes de energía del campo neutrínico; y así sucesivamente.

A pesar de esta imponente síntesis, gran parte del trabajo sobre fotones y electrones en los años treinta y cuarenta se enmarcaba en el contexto de la vieja electrodinámica cuántica dualista, en la que los fotones eran considerados como paquetes de energía del campo electromagnético pero los electrones eran simplemente partículas materiales. En lo que respecta a electrones y fotones esto da los mismos resultados que la teoría cuántica de campos. Pero, en la época en que yo era un estudiante licenciado en los años cincuenta, la teoría cuántica de campos había llegado a ser aceptada casi universalmente como la herramienta correcta para la física fundamental. En la receta del mundo de los físicos la lista de ingredientes ya no incluía partículas, sino sólo unos pocos tipos de campos.

De esta historia podemos sacar la moraleja de que resulta temerario suponer siquiera que uno conoce los términos en los que será formulada una futura teoría final. Richard Feynman se quejaba en cierta ocasión de que los periodistas preguntan por las teorías futuras como si la clave estuviera en la partícula última de materia o en la unificación final de todas las fuerzas, aunque de hecho no tenemos idea de si éstas son las preguntas correctas. Parece poco probable que la vieja e ingenua concepción mecanicista sea

resucitada, o que tengamos que volver a un dualismo de partículas y campos, pero ni siquiera la teoría cuántica de campos es segura. Existen dificultades para incluir la gravitación en el marco de la teoría cuántica de campos. De los esfuerzos para superar estas dificultades ha surgido recientemente un candidato a teoría final en la que los propios campos son solamente manifestaciones de baja energía de «tropezones» en el espacio-tiempo conocidos como cuerdas. Probablemente no sabremos las preguntas correctas hasta que estemos cerca de saber las respuestas.

Aunque el mecanicismo ingenuo parece definitivamente muerto, hay otras presuposiciones metafísicas que continúan molestando a la física, especialmente aquellas que tienen que ver con el espacio y el tiempo. La duración del tiempo es lo único que podemos medir (aunque imperfectamente) mediante el puro entendimiento, sin ningún estímulo en nuestros sentidos, de modo que es natural imaginar que podemos aprender algo sobre la dimensión del tiempo mediante la razón pura. Kant enseñaba que el espacio y el tiempo no son parte de la realidad externa, sino que más bien son estructuras preexistentes en nuestras mentes que nos permiten relacionar objetos y sucesos. Lo que más podía sorprender a un kantiano en las teorías de Einstein era que devolvían al espacio y al tiempo el estatus de aspectos ordinarios del universo físico, aspectos que podrían verse afectados por el movimiento (en la relatividad especial) o la gravitación (en la relatividad general). Incluso ahora, casi un siglo después del advenimiento de la relatividad especial, algunos físicos siguen pensando que se puede



hablar acerca del espacio y el tiempo sobre la base del pensamiento puro.

Esta metafísica intransigente sale a la superficie especialmente en las discusiones sobre el origen del universo. Según la teoría del *big bang* estándar, el universo nació en un momento de temperatura y densidad infinitas hace entre 10 y 15 mil millones de años. Una y otra vez, cuando he dado alguna conferencia sobre la teoría del *big bang*, alguien de la audiencia ha argumentado durante el tiempo de preguntas que la idea de un comienzo es absurda; cualquiera que sea el instante en que decimos que fue el comienzo del *big bang*, debe haber existido un momento anterior a él. He tratado de explicar que esto no es necesariamente así. Es cierto, por ejemplo, que en nuestra experiencia ordinaria, por mucho frío que haga siempre es posible que haga un frío mayor, pero, en cambio, existe un 0 absoluto; no podemos alcanzar temperaturas por debajo del 0 absoluto, no porque no seamos suficientemente inteligentes, sino porque las temperaturas por debajo del 0 absoluto simplemente no tienen significado. Stephen Hawking ha propuesto la que puede ser una analogía mejor: tiene sentido preguntar cuál es el norte de Austin o de Cambridge o de cualquier otra ciudad, pero no tiene sentido preguntar cuál es el norte del Polo Norte. Es famosa la discusión de san Agustín sobre este problema en sus *Confesiones*, donde llegó a la conclusión de que es erróneo preguntar qué existía antes de que Dios crease el universo, debido a que Dios, que está fuera del tiempo, creó el tiempo junto con el universo. La misma opinión mantenía Moses Maimónides.

Debería reconocer aquí que en realidad no sabemos si el universo empezó en algún momento definido en el pasado. Andre Linde y otros cosmólogos han propuesto recientemente teorías plausibles que describen nuestro universo actual en expansión simplemente como una pequeña burbuja dentro de un megauniverso infinitamente viejo, en el que semejantes burbujas están apareciendo eternamente y engendrando nuevas burbujas<sup>97</sup>. No estoy tratando aquí de argumentar que el universo tiene indudablemente alguna edad finita, sino solamente que no es posible decir sobre la base del puro pensamiento que no la tiene.

Aquí, una vez más, ni siquiera sabemos si estamos planteando las cuestiones correctas. En la versión más reciente de la teoría de cuerdas, el espacio y el tiempo se presentan como magnitudes derivadas que no aparecen en las ecuaciones fundamentales de la teoría. En estas teorías, el espacio y el tiempo tienen sólo un significado aproximado; no tiene sentido hablar de un instante que esté más próximo al *big bang* que una millonésima de billonésima de billonésima de segundo, aproximadamente. En nuestras vidas normales podemos notar apenas un intervalo de tiempo de una centésima de segundo, de modo que las certezas intuitivas sobre la naturaleza del espacio y del tiempo que derivamos de nuestra experiencia cotidiana no son realmente de mucho valor al tratar de articular una teoría del origen del universo. No es en la metafísica donde la física moderna encuentra sus mayores problemas, sino en la epistemología, el estudio de la

---

<sup>97</sup> Este trabajo se basa en la llamada cosmología inflacionaria de Alan Guth.

naturaleza y las fuentes del conocimiento. La doctrina epistemológica del positivismo (o, en algunas versiones, el positivismo lógico), demanda no sólo que la ciencia deba contrastar finalmente sus teorías frente a la observación (lo que difícilmente puede ser cuestionado), sino que todo aspecto de nuestras teorías debe en todo punto referirse a magnitudes observables. Es decir, aunque las teorías físicas puedan implicar aspectos que no han sido aún estudiados observacionalmente y sería demasiado costoso estudiarlos este año o el próximo, sería inadmisibles para nuestras teorías tratar con elementos que, en principio, no pudieran ser nunca observados. Aquí hay mucho en juego, porque si el positivismo fuera válido nos permitiría descubrir claves valiosas sobre los ingredientes de la teoría final utilizando experimentos mentales para descubrir qué tipo de cosas pueden ser observadas en principio.

La figura más a menudo asociada a la introducción del positivismo en la física es Ernst Mach, físico y filósofo de la Viena de fin de siglo, para quien el positivismo sirvió esencialmente como un antídoto contra la metafísica de Immanuel Kant. El artículo de Einstein de 1905 sobre la relatividad especial muestra la influencia obvia de Mach; está lleno de observadores que miden distancias y tiempos con reglas, relojes y rayos de luz. El positivismo le sirvió a Einstein para liberarse de la noción de que existe un sentido absoluto para la afirmación de que dos sucesos son simultáneos; encontró que ninguna medida podría proporcionar un criterio de simultaneidad que diera el mismo resultado para todos los observadores. Este

interés en lo que realmente puede ser observado es la esencia del positivismo. Einstein reconoció su deuda con Mach; en una carta que le dirigió pocos años más tarde él mismo se calificaba de «su devoto alumno<sup>lxii</sup>». Tras la primera guerra mundial, el positivismo tuvo un desarrollo adicional por parte de Rudolf Carnap y los miembros del Círculo de Viena, que pretendían una reconstrucción de la ciencia según líneas filosóficamente satisfactorias y tuvieron éxito al barrer mucha basura metafísica.

El positivismo desempeñó también un papel importante en el nacimiento de la mecánica cuántica moderna. El primer gran artículo de Heisenberg sobre mecánica cuántica de 1925 comienza con la observación de que «es bien sabido que las reglas formales que son utilizadas [en la teoría cuántica de Bohr de 1913] para calcular magnitudes observables tales como la energía del átomo de hidrógeno podrían ser criticadas fuertemente sobre la base de que contienen, como elementos básicos, relaciones entre magnitudes que en principio son aparentemente inobservables, por ejemplo, la posición y la velocidad de revolución de los electrones<sup>lxiii</sup>». En el espíritu del positivismo, Heisenberg admitió en su versión de la mecánica cuántica solamente observables, tales como los ritmos a los que un átomo puede hacer espontáneamente una transición de un estado a otro emitiendo un cuanto de radiación. El principio de incertidumbre, que es uno de los fundamentos de la interpretación probabilística de la mecánica cuántica, se basa en el análisis positivista de Heisenberg de las limitaciones que encontramos cuando queremos observar la posición y el momento de una

partícula.

A pesar de su valor para Einstein y Heisenberg, el positivismo ha hecho tanto daño como bien. Pero, a diferencia de la concepción mecanicista, el positivismo ha conservado su aura heroica, de modo que sobrevive para seguir haciendo daño en el futuro. George Gale culpa incluso al positivismo de gran parte de la actual separación entre físicos y filósofos<sup>lxiv</sup>.

El positivismo estaba en el centro de la oposición a la teoría atómica a comienzos del siglo xx. El siglo xix había presenciado un refinamiento maravilloso de la vieja idea de Demócrito y Leucipo de que toda la materia está compuesta de átomos, y la teoría atómica había sido utilizada por John Dalton y Amedeo Avogadro y sus sucesores para dar sentido a las reglas de la química, las propiedades de los gases y la naturaleza del calor. La teoría atómica había llegado a ser parte del lenguaje ordinario de la física y de la química. Pero los seguidores positivistas de Mach consideraban esto como un alejamiento del procedimiento propio de la ciencia porque estos átomos no podrían ser observados con ninguna de las técnicas entonces imaginables. Los positivistas decretaron que los científicos deberían preocuparse simplemente por informar de los resultados de las observaciones, como, por ejemplo, que se necesitan dos volúmenes de hidrógeno para combinarse con un volumen de oxígeno y dar vapor de agua; pero no deberían preocuparse con especulaciones sobre ideas metafísicas que afirmen que esto es debido a que la molécula de agua consta de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno puesto que no podrían observar

estos átomos o moléculas. El propio Mach nunca aceptó la existencia de los átomos. Todavía en 1910, después de que el atomismo había sido aceptado por casi todos los científicos, Mach escribió, en un debate con Planck, que «si la creencia en la realidad de los átomos es tan crucial, entonces yo rechazo la manera de pensar de la física. Yo no seré un físico profesional y renunciaré a mi reputación científica<sup>lxv</sup>».

La resistencia al atomismo tuvo un efecto particularmente desafortunado al retrasar la aceptación de la mecánica estadística, la teoría reduccionista que interpreta el calor en términos de la distribución estadística de las energías de las partes de cualquier sistema. El desarrollo de esta teoría en la obra de Maxwell, Boltzmann, Gibbs y otros fue uno de los triunfos de la ciencia del siglo XIX y, al rechazarla, los positivistas estaban cometiendo el peor error que un científico puede cometer: no reconocer el éxito cuando tiene lugar.

El positivismo causó daño de otras formas que son menos conocidas. Hay un experimento célebre, realizado en 1897 por J. J. Thomson, que se considera generalmente como el descubrimiento del electrón. (Thomson fue el sucesor de Maxwell y Rayleigh como *Cavendish Professor* en la Universidad de Cambridge). Durante algunos años los físicos habían estado intrigados con el fenómeno misterioso de los rayos catódicos, rayos que son emitidos cuando una placa de metal en un tubo de vacío de vidrio se conecta al terminal negativo de una potente batería eléctrica y que manifiestan su presencia mediante una mancha luminosa en el extremo opuesto

del tubo de vidrio donde inciden. Los tubos de los televisores modernos no son otra cosa que tubos de rayos catódicos en los que la intensidad de los rayos está controlada por las señales enviadas por las estaciones de televisión. Cuando los rayos catódicos fueron descubiertos por primera vez en el siglo XIX nadie supo al principio en qué consistían. Más tarde, Thomson midió la desviación que los campos eléctrico y magnético producen en los rayos catódicos cuando éstos atraviesan el tubo de vacío. Resultaba que el valor de la desviación de estos rayos era compatible con la hipótesis de que están constituidos por partículas que transportan una cantidad definida de carga eléctrica y una cantidad definida de masa, siempre con la misma relación de masa a carga. Puesto que la masa de estas partículas resultaba ser mucho más pequeña que la masa de los átomos, Thomson llegó a la conclusión de que estas partículas son los constituyentes fundamentales de los átomos y los portadores de la carga eléctrica en todas las corrientes de electricidad, ya sea en cables y en átomos, ya sea en tubos de rayos catódicos. Por esta razón, el propio Thomson se consideró, y ha sido universalmente considerado por los historiadores, el descubridor de una nueva forma de materia, una partícula para la que escogió un nombre que ya era corriente en la teoría de la electrólisis: el electrón.

Pero el mismo experimento fue realizado en Berlín aproximadamente en la misma época por Walter Kaufmann. La principal diferencia entre el experimento de Kaufmann y el de Thomson consistía en que el de Kaufmann era mejor. Éste dio un resultado para la relación entre la carga y la masa del electrón que

hoy sabemos que es más aproximado que el de Thomson. Pero Kaufmann nunca es citado como el descubridor del electrón, porque él no pensó que hubiera descubierto una nueva partícula. Thomson trabajaba dentro de una tradición inglesa que se remontaba a Newton, Dalton y Prout; una tradición de especulación acerca de los átomos y sus constituyentes. Pero Kaufmann era un positivista; él no creía que la tarea de los físicos consistiera en especular sobre cosas que no podrían observar<sup>98</sup>. Así, Kaufmann no informó de que había descubierto un nuevo tipo de partícula, sino solamente de que, sea lo que fuere lo que está fluyendo en un rayo catódico, transporta una cierta cantidad de carga eléctrica con relación a su masa.

La moraleja de esta historia no es simplemente que el positivismo resultó perjudicial para la carrera de Kaufmann. Thomson, guiado por su creencia de que había descubierto una partícula fundamental, continuó haciendo nuevos experimentos para explorar sus propiedades. Encontró evidencia de partículas con la misma relación de carga a masa emitidas en la radiactividad y también por los metales calentados, y llevó a cabo una primera medición de la carga eléctrica del electrón. Esta medición, junto con sus primeras mediciones de la relación entre carga y masa, proporcionó un valor para la masa del electrón. Es la suma de todos estos experimentos lo que realmente da validez a la afirmación de Thomson de ser el descubridor del electrón, pero él probablemente nunca la habría hecho si no hubiera estado dispuesto a tomar en serio la idea de

---

<sup>98</sup> Mi amigo Sambursky (a quien cito en el cap. 5) conoció cuando era muy joven a Kaufmann. Él confirmó mi impresión de Kaufmann como una persona rígida limitada por su propia filosofía.



una partícula que, en su época, no podía ser directamente observada.

Visto en retrospectiva, el positivismo de Kaufmann y de quienes se oponían al atomismo no sólo parece obstruccionista sino también ingenuo. Después de todo, ¿qué significa observar algo? En un sentido estricto, Kaufmann ni siquiera observó la desviación de los rayos catódicos en un campo magnético dado; simplemente midió la posición de un punto luminoso en un extremo del tubo de vacío cuando unos cables eléctricos, bobinados un cierto número de veces en torno a un trozo de hierro próximo al tubo, eran conectados a una batería eléctrica dada, y luego utilizó la teoría aceptada para interpretar esto en términos de trayectorias de rayos y campos magnéticos. En un sentido todavía más estricto, ni siquiera hizo eso; simplemente experimento ciertas sensaciones visuales y táctiles que interpretó en términos de puntos luminosos, cables y baterías. Ha llegado a ser un tópico entre los historiadores de la ciencia el que la observación nunca puede estar libre de teoría<sup>lxvi</sup>.

Normalmente se considera que la rendición final de los antiatomistas viene marcada por una afirmación del químico Wilhelm Ostwald en la edición de 1908 de su *Outlines of General Chemistry*: «Ahora estoy convencido de que recientemente hemos llegado a tener evidencia experimental de la naturaleza discreta o granular de la materia, algo que la hipótesis atómica había buscado en vano durante cientos y miles de años». La evidencia experimental que Ostwald citaba consistía, además de la medición de Thomson de la carga del electrón, en las mediciones de impactos moleculares

en el llamado movimiento browniano de partículas minúsculas suspendidas en líquidos. Pero, si uno reflexiona en la carga de teoría que hay en todos los datos experimentales, resulta evidente que todos los éxitos de la teoría atómica en química y en mecánica estadística ya en el siglo XIX habían constituido una observación de los átomos.

El propio Heisenberg cuenta que Einstein cambió de opinión sobre el positivismo de su enfoque inicial de la relatividad. En una conferencia en 1974 Heisenberg recordaba una conversación que había mantenido con Einstein en Berlín a comienzos de 1926:

Yo le señalé [a Einstein] que nosotros no podemos de hecho observar semejante trayectoria [de un electrón en un átomo]; lo que realmente registramos son las frecuencias de la luz emitida por el átomo, las intensidades y las probabilidades de transición, pero no las trayectorias reales, y puesto que no hay nada más racional que introducir en una teoría sólo las cantidades que pueden ser directamente observadas, el concepto de trayectorias electrónicas no debería, de hecho, figurar en la teoría. Para mi sorpresa, Einstein no quedó en absoluto satisfecho con este argumento. Él pensaba que toda teoría contiene de hecho cantidades inobservables. El principio de utilizar únicamente magnitudes observables sencillamente no puede ser desarrollado de forma consistente. Y cuando objeté que al hacer esto yo simplemente había estado aplicando el tipo de filosofía que también él había puesto en la base de su teoría de la relatividad especial, él respondió simplemente: «Quizá yo utilicé esta filosofía antes, y también la escribí, pero en cualquier caso es absurda<sup>lxvii</sup>».

Incluso antes, en una conferencia en París en 1922, Einstein se refirió a Mach como «un buen mecanicista» pero un «filósofo deplorable<sup>lxviii</sup>».

A pesar de la victoria del atomismo y la defección de Einstein, el tema del positivismo ha seguido dando que hablar de vez en cuando en la física del siglo xx. La concentración positivista en observables como las posiciones y los momentos de las partículas ha permanecido en forma de una interpretación «realista» de la mecánica cuántica en la que la función de onda es la representación de la realidad física. El positivismo también jugó su papel en obscurecer el problema de los infinitos. Como hemos visto, Oppenheimer señaló en 1930 que la teoría de los fotones y de los electrones conocida como electrodinámica cuántica llevaba a un resultado absurdo, el de que la emisión y absorción de fotones por un electrón en un átomo daría al átomo una energía infinita. El problema de los infinitos preocupó a los teóricos durante los años treinta y cuarenta, y condujo a la suposición general de que la electrodinámica cuántica sería simplemente inaplicable para electrones y fotones de muy alta energía. Mucho de este malestar con la electrodinámica cuántica estaba teñido de un sentido de culpa positivista: algunos teóricos temían que al hablar de los valores de los campos eléctrico y magnético en un punto del espacio ocupado por un electrón estaban cometiendo el pecado de introducir en la física elementos que en principio no pueden ser observados. Esto era cierto, pero lamentarse de ello sólo retrasó el descubrimiento de la solución real al problema de los infinitos, el

que los infinitos se cancelan cuando se pone el debido cuidado en la definición de la masa y carga del electrón.

El positivismo también jugó un papel clave en la reacción contra la teoría cuántica de campos encabezada por Geoffrey Chew en Berkeley en los años sesenta. Para Chew, el objeto central de interés en la física era la matriz  $S$ , la tabla que da las probabilidades de todos los resultados posibles de todas las colisiones posibles entre partículas. La matriz  $S$  resume todo lo que es realmente observable en las reacciones que involucran cualquier número de partículas. La teoría de la matriz  $S$  se remonta al trabajo de Heisenberg y John Wheeler en los años treinta y cuarenta (la « $S$ » viene de *streung*, que es la palabra alemana para «scattering», dispersión), pero Chew y sus colaboradores estaban utilizando nuevas ideas sobre la forma de calcular la matriz  $S$  sin introducir ningún elemento inobservable como los campos cuánticos. Finalmente, este programa fracasó, en parte debido simplemente a que era demasiado difícil calcular la matriz  $S$  de esta forma, pero sobre todo debido a que el camino hacia un progreso en la comprensión de las fuerzas nucleares débiles y fuertes resultó estar en las teorías cuánticas de campos que Chew estaba tratando de abandonar<sup>99</sup>.

El abandono más espectacular de los principios del positivismo se ha producido en el desarrollo de nuestra teoría actual de los quarks.

---

<sup>99</sup> De todas formas, pienso que hemos aprendido lecciones valiosas de la teoría de la matriz  $S$ . La teoría cuántica de campos es como es porque es la única forma de garantizar que los observables de la teoría, y en particular la matriz  $S$ , tuvieran propiedades físicas razonables. En 1981 di una charla en el Radiation Laboratory en Berkeley y, como sabía que Geoffrey Chew estaría en la audiencia, me salí un poco de mi tema para decir cosas bonitas sobre la influencia positiva de la teoría de la matriz  $S$ . Después de la charla, Geoff se me acercó y dijo que agradecía mis comentarios pero que él estaba trabajando ahora en teoría cuántica de campos.

A comienzos de los años sesenta, Murray Gell-Mann y George Zweig, independientemente, trataron de reducir la enorme complejidad del zoo de las partículas conocidas en esa época. Propusieron que casi todas estas partículas están compuestas de unas pocas partículas simples (e incluso más elementales) que Gell-Mann llamó quarks. Esta idea no parecía en un primer momento estar enteramente al margen de la corriente principal del pensamiento a la que estaban acostumbrados los físicos; después de todo, era un paso más en una tradición, que había comenzado con Leucipo y Demócrito, de tratar de explicar estructuras complicadas en términos de constituyentes más pequeños y más simples. La imagen del quark fue aplicada en los años sesenta a una gran variedad de problemas físicos relacionados con las propiedades de los neutrones, protones, mesones y todas las demás partículas que se suponían formadas a partir de quarks, y en general funcionó bastante bien. Pero los mejores esfuerzos de los físicos experimentales en los años sesenta y principios de los setenta se mostraron incapaces de separar los quarks de las partículas en las que supuestamente estaban contenidos. Esto parecía un sinsentido. Desde que Thomson extrajo electrones de los átomos en un tubo de rayos catódicos, siempre había sido posible romper cualquier sistema compuesto, tal como una molécula o un átomo o un núcleo, y aislar las partículas individuales que lo componían. ¿Por qué entonces debería ser imposible aislar quarks?

La imagen de los quarks empezó a tomar sentido con la aparición, a comienzos de los años setenta, de la cromodinámica cuántica,

nuestra teoría moderna de las fuerzas nucleares fuertes, que prohíbe cualquier proceso en el que un quark libre pueda quedar aislado. El avance definitivo vino en 1973, cuando cálculos realizados independientemente por David Gross y Frank Wilczek, en Princeton, y David Politzer, en Harvard, mostraron que ciertos tipos de teorías cuánticas de campos<sup>100</sup> tienen una propiedad peculiar, conocida como «libertad asintótica», que consiste en que las fuerzas en dichas teorías decrecen a altas energías<sup>101</sup>. Precisamente tal decrecimiento en la fuerza había sido observado en experimentos de dispersión a altas energías que se remontaban a 1967<sup>102</sup>, pero ésta era la primera vez que se podía demostrar que una teoría contenía fuerzas que se comportan de esta forma. Este éxito condujo rápidamente a que una de estas teorías cuánticas de campos, la teoría de los quarks y gluones conocida como cromodinámica cuántica, fuese aceptada como la teoría correcta de las fuerzas nucleares fuertes.

En un primer momento, se había pensado que el hecho de que no se hubiera observado la producción de gluones en colisiones entre partículas elementales era debido a que aquéllos eran muy pesados y no había suficiente energía disponible en estas colisiones para producir gluones de gran masa. Inmediatamente después del

---

<sup>100</sup> Me estoy refiriendo aquí a las llamadas teorías gauge no abelianas o de Yang-Mills.

<sup>101</sup> Este cálculo utilizaba métodos matemáticos introducidos en 1954 en el contexto de la electrodinámica cuántica por Murray Gell-Mann y Francis Low. Pero la fuerza en electrodinámica cuántica y en la mayoría de las otras teorías aumenta cuando aumenta la energía.

<sup>102</sup> Particularmente los experimentos sobre fractura de neutrones y protones por electrones de alta energía llevados a cabo en el Stanford Linear Accelerator Center por un grupo encabezado por Jerome Friedman, Henry Kendall, y Richard Taylor.

descubrimiento de la libertad asintótica, algunos teóricos<sup>103</sup> propusieron en su lugar que los gluones son partículas sin masa, como los fotones. Si esto fuera cierto, entonces la razón de que los gluones, y presumiblemente también los quarks, no sean observados tendría que estar en que el intercambio de gluones sin masa entre quarks o gluones produce fuerzas de largo alcance que hacen imposible en principio tirar de los quarks o de los gluones para dejarlos sueltos. Ahora se cree que si uno trata, por ejemplo, de separar un mesón (una partícula compuesta de un quark y de un antiquark), la fuerza necesaria aumenta a medida que el quark y el antiquark se van separando, hasta que finalmente uno tiene que poner tanta energía en el esfuerzo que hay la suficiente energía disponible para crear un nuevo par quark-antiquark<sup>104</sup>. Entonces un antiquark surge del vacío y se une al quark original, al tiempo que otro quark surge del vacío y se une al antiquark original, de modo que en lugar de tener un quark y un antiquark libres usted simplemente tiene dos pares quark-antiquark, es decir, dos mesones. Con frecuencia se ha utilizado la metáfora de que esto es como tratar de separar los dos cabos de un trozo de cuerda: usted puede tirar y tirar, y finalmente, si pone bastante energía en el esfuerzo, la cuerda se rompe, pero usted no se encuentra con dos cabos aislados del trozo de cuerda original; lo que usted tiene son dos trozos de cuerda, cada uno de ellos con dos extremos. La idea de que los quarks y los gluones no pueden ser observados

---

<sup>103</sup> Gross y Wilczek, y yo mismo.

<sup>104</sup> Por lo que yo sé, esta imagen se debe independientemente a G. 't Hooft y L. Susskind. Una sugerencia anterior del confinamiento de quarks fue hecha también por H. Fritzsche, M. Gell-Mann, y H. Leutwyler.

aisladamente ha llegado a ser parte del saber aceptado en la moderna física de partículas elementales, pero esto no nos impide describir los neutrones, protones y mesones como compuestos de quarks<sup>105</sup>. No puedo imaginar nada que hubiera gustado menos a Ernst Mach.

La teoría de los quarks fue sólo un paso en un proceso continuo de reformulación de la teoría física en términos cada vez más fundamentales y, al mismo tiempo, cada vez más alejados de la experiencia cotidiana. ¿Cómo podemos tener esperanzas de construir una teoría basada en observables cuando ningún aspecto de nuestra experiencia, quizá ni siquiera el espacio y el tiempo, aparecen en el nivel más fundamental de nuestras teorías? Me parece poco probable que la actitud positivista sea de mucha ayuda en el futuro.

La metafísica y la epistemología tenían, al menos, la intención de jugar un papel constructivo en la ciencia. Pero en años recientes la ciencia ha sufrido el ataque de comentaristas hostiles reunidos bajo el estandarte del relativismo. Los relativistas filosóficos niegan la pretensión de la ciencia del descubrimiento de la verdad objetiva; ellos la ven simplemente como otro fenómeno social, no

---

<sup>105</sup> La cuestión de la existencia de los quarks se hizo inevitable con el descubrimiento en 1974 a cargo de grupos encabezados por Burton Richter y Sam Ting de una partícula que ellos llamaron, respectivamente, partícula *psi* y partícula *J*. Las propiedades de esta partícula mostraban claramente que consistía en un nuevo quark pesado y su antiquark, incluso aunque estos quarks no podían producirse aisladamente. (La existencia de este tipo de quark pesado había sido propuesta anteriormente por Sheldon Glashow, John Iliopoulos y Luciano Maiani como un medio de evitar ciertos problemas de la teoría de las interacciones débiles, y su masa había sido estimada teóricamente por Mary Gaillard y Ben Lee. La partícula J-psi había sido predicha por Thomas Appelquist y David Politzer).



esencialmente diferente de un culto de fertilidad o un *potlatch*<sup>106</sup>.

El relativismo filosófico deriva en alguna medida del descubrimiento por parte de los filósofos e historiadores de la ciencia de que existe un gran elemento subjetivo en el proceso mediante el cual las ideas científicas llegan a ser aceptadas<sup>lxi</sup>. Hemos visto aquí el papel que los juicios estéticos juegan en la aceptación de las nuevas teorías físicas. Esto es una vieja historia para los científicos (aunque los filósofos y los historiadores escriben a veces como si nosotros fuésemos tremendamente ingenuos sobre esto). En su celebrado libro *La estructura de las revoluciones científicas*, Thomas Kuhn fue un paso más lejos y argumentó que, en las revoluciones científicas, los patrones (o «paradigmas») de los que se valen los científicos para juzgar las teorías cambian, de modo que las nuevas teorías no pueden ser juzgadas con los patrones prerrevolucionarios<sup>lxx</sup>. Hay mucho en el libro de Kuhn que encaja con mi propia experiencia de la ciencia. Pero en el último capítulo Kuhn intenta atacar la idea de que la ciencia hace progresos hacia verdades objetivas: «Para ser más precisos tendríamos que renunciar a la noción, explícita o implícita, de que los cambios de paradigma llevan a los científicos, y a aquellos que aprenden de ellos, cada vez más cerca de la verdad». El libro de Kuhn parece haber sido leído posteriormente (o por lo menos citado) como si fuera un manifiesto para un ataque general a la presunta objetividad de la ciencia.

Ha habido también una tendencia en aumento, que se inició con la obra de Robert Merton en los años treinta, según la cual los

---

<sup>106</sup> Rito de los indios kwakiutl de la Columbia Británica que consiste en la destrucción de objetos preciosos con el fin de demostrar que se es rico. (*N. del t.*)

sociólogos y antropólogos tratan la empresa de la ciencia (o al menos, las ciencias distintas de la sociología y la antropología) con los mismos métodos que se utilizan para estudiar otros fenómenos sociales. La ciencia es por supuesto un fenómeno social, con su propio sistema de recompensa, sus esnobismos patentes, sus interesantes patrones de alianza y autoridad. Por ejemplo, Sharon Traweek ha pasado años junto a los físicos experimentales de partículas elementales, tanto en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford como en el KEK Laboratory en Japón, y ha descrito lo que ella ha visto desde la perspectiva de un antropólogo. Este tipo de Gran Ciencia es un tema natural para los antropólogos y los sociólogos, porque los científicos pertenecen a una tradición anárquica que premia a la iniciativa individual y, sin embargo, se encuentran en los experimentos actuales con que tienen que trabajar agrupados en equipos de centenares de personas. Como yo soy un teórico no he trabajado en equipos semejantes, pero muchas de sus observaciones me parecen certeras, como, por ejemplo:

Los físicos se ven a sí mismos como una élite a la que se pertenece exclusivamente por mérito científico. Se supone que todo el mundo es de entrada igual. Esto queda subrayado por el código indumentario rigurosamente informal, la similitud de sus despachos, y el uso del «nombre de pila» en la comunidad. El individualismo competitivo se considera justo y eficaz: la jerarquía se ve como una meritocracia que produce buena física. Los físicos norteamericanos, no obstante, señalan que la ciencia no es democrática: las decisiones sobre objetivos científicos no deberían

tomarse por la regla de la mayoría dentro de la comunidad, ni debería haber un acceso igualitario a los recursos de un laboratorio. Sobre estas dos cuestiones, la mayoría de los físicos japoneses opinan lo contrario<sup>lxxi</sup>.

En el curso de estos estudios, los sociólogos y antropólogos han descubierto que incluso el proceso de cambio en una teoría científica es un proceso social. Un libro reciente sobre el *peer review*, el juicio de los pares, señala que «las verdades científicas son, en el fondo, contratos sociales ampliamente citados sobre lo que es “real”, a los que se llega a través de un característico “proceso científico” de negociación<sup>lxxii</sup>». La observación cercana del trabajo de los científicos en el Salk Institute llevó al filósofo francés Bruno Latour y al sociólogo inglés Steve Woolgar a comentar: «Las negociaciones sobre lo que cuenta como prueba o lo que constituye un buen intento no son ni más ni menos desordenadas que cualquier discusión entre abogados o políticos<sup>lxxiii</sup>».

Parece que ha sido fácil pasar de estas útiles observaciones históricas y sociológicas a la posición radical de que el contenido de las teorías científicas que llegan a ser aceptadas es el que es a causa del escenario social e histórico en el que se negocian las teorías. (La elaboración de esta posición se conoce a veces como el programa fuerte en sociología de la ciencia). Este ataque a la objetividad del conocimiento científico se hace explícito, ya incluso en el título, en un libro de Andrew Pickering: *La construcción de los quarks*<sup>lxxiv</sup>. En su capítulo final llega a la siguiente conclusión: «Y, dada su formación extensiva en las sofisticadas técnicas matemáticas, la

preponderancia de las matemáticas en las explicaciones de la realidad que dan los físicos de partículas no es más difícil de explicar que el apego de los grupos étnicos a sus propias lenguas nativas. Desde el punto de vista defendido en este capítulo, no pesa ninguna obligación sobre nadie de construir una imagen del mundo para tener en cuenta lo que la ciencia del siglo xx tiene que decir». Pickering describe en detalle un cambio de enfoque que tuvo lugar en la física experimental de altas energías a finales de los años sesenta y principios de los setenta. En lugar de una aproximación de sentido común (el término es de Pickering) que consistiría en concentrarse en los fenómenos más habituales en las colisiones entre partículas de alta energía (por ejemplo, en la fragmentación de partículas en un gran número de otras partículas que salen principalmente en la dirección del haz de partículas original), los experimentadores empezaron a hacer experimentos sugeridos por los teóricos, experimentos que se centraban en sucesos infrecuentes tales como aquéllos en los que alguna partícula de alta energía emerge de la colisión en una dirección que forma un ángulo elevado con la dirección del haz incidente.

Ciertamente hubo un cambio de enfoque en la física de alta energía, en la línea que describe bien Pickering, pero fue impulsado por las necesidades de la misión histórica de la física. Un protón consta de tres quarks junto con una nube de pares quark-antiquark que están apareciendo y desapareciendo continuamente. En la mayoría de las colisiones entre protones, la energía de las partículas iniciales da lugar a una desorganización general de estas nubes de partículas,

como sucede en una colisión entre dos camiones de recogida de basura. Éstas pueden ser las colisiones más frecuentes, pero son demasiado complicadas para permitirnos el cálculo de lo que sucedería de acuerdo con nuestra actual teoría de quarks y gluones y, por consiguiente, resultan inútiles para verificar dicha teoría. Sin embargo, de cuando en cuando un quark o un gluón de uno de los dos protones incide frontalmente sobre un quark o un gluón del otro protón, y se tiene la energía disponible para expulsar estos quarks o gluones a alta energía separados de los residuos de la colisión, un proceso cuyo ritmo de producción sabemos calcular.

O también puede suceder que la colisión cree nuevas partículas, como las partículas  $W$  y  $Z$  portadoras de la fuerza nuclear débil, que necesitan ser estudiadas para aprender más acerca de la unificación de las fuerzas débil y electromagnética. Éstos son los sucesos infrecuentes para cuya detección se han diseñado los experimentos actuales. Pero Pickering, que hasta dónde puedo ver conoce bastante bien el fundamento teórico, sigue describiendo este cambio de enfoque en la física de alta energía en términos que sugieren un simple cambio de moda, como el cambio del impresionismo al cubismo o de la falda corta a la larga<sup>107</sup>.

Es sencillamente una falacia lógica pasar de la observación de que la ciencia es un proceso social a la conclusión de que el producto final, nuestras teorías científicas, es el que es a causa de las fuerzas

---

<sup>107</sup> Opiniones similares fueron expresadas en los primeros escritos (hace más de veinte años) de Feyerabend, pero desde entonces él ha cambiado su modo de pensar. Traweek evita cuidadosamente esta cuestión; expresa sus simpatías sobre la visión de los físicos de que el electrón existe, reconociendo que encuentra apropiado en su trabajo suponer que los físicos existen.

sociales e históricas que actúan sobre este proceso. Un grupo de escaladores podrá discutir sobre cuál es la mejor vía hacia la cima, y estas discusiones pueden estar condicionadas por la estructura histórica y social de la expedición, pero al final encuentran o no una buena vía hacia la cima, y cuando lo hacen la reconocen. (Nadie pondría a un libro sobre escalada el título de *La construcción del Everest*). Yo no puedo probar que la ciencia es así, pero todo en mi experiencia como científico me lleva a la convicción de que es así. Las «negociaciones» sobre cambios en las teorías científicas se dan, y los científicos cambian sus ideas una y otra vez en respuesta a cálculos y experimentos, hasta que finalmente una opinión u otra queda marcada con una señal inequívoca de éxito científico. Ciertamente tengo la sensación de que estamos descubriendo algo real en la física, algo que es como es independientemente de las condiciones sociales e históricas que nos han permitido descubrirlo. ¿De dónde procede este ataque radical a la objetividad del conocimiento científico? Creo que una fuente es el viejo espantajo del positivismo, esta vez aplicado al estudio de la propia ciencia. Si uno se niega a hablar sobre cualquier cosa que no sea directamente observada, entonces las teorías cuánticas de campos o los principios de simetría o las leyes más generales de la naturaleza no pueden ser tomados en serio. Lo que los filósofos y sociólogos y antropólogos *pueden* estudiar es el comportamiento real de los científicos genuinos, y este comportamiento nunca sigue una simple descripción en términos de reglas de inferencia. Pero los científicos tienen la experiencia directa de las teorías científicas como objetivos

deseados, aunque elusivos, y han llegado a convencerse de la realidad de estas teorías.

Puede haber otra motivación para el ataque al realismo y la objetividad de la ciencia, una motivación de menos vuelos. Imagine que usted es un antropólogo que estudia los *cargo cults* en una isla del Pacífico. Los isleños creen que pueden hacer regresar al avión de carga que les hizo prósperos durante la segunda guerra mundial construyendo estructuras de madera que imitan al radar y a las antenas de radio. Sencillamente forma parte de la naturaleza humana el que este antropólogo y otros sociólogos y antropólogos en circunstancias similares sientan un estremecimiento de superioridad porque saben, a diferencia de sus sujetos de estudio, que no existe realidad objetiva en estas creencias: ningún C-47 de carga será nunca atraído por los radares de madera. ¿Podría sorprender el que, cuando los antropólogos y sociólogos volvieron su atención al estudio del trabajo de los científicos, trataran de recuperar este delicioso sentido de superioridad negando la realidad objetiva de los descubrimientos científicos?

El relativismo es sólo un aspecto de un ataque más amplio y más radical a la propia ciencia<sup>108</sup>. Feyerabend apelaba a una separación formal entre la ciencia y la sociedad como la separación entre Iglesia y Estado, razonando que «la ciencia es sólo una de las muchas ideologías que impulsan a la sociedad y debería ser tratada como tal<sup>lxxv</sup>». La filósofa Sandra Harding califica a la ciencia moderna (y

---

<sup>108</sup> Para una recopilación de artículos sobre los críticos de la ciencia, véase *Science and Its Public: The Changing Relationship*, eds. G. Holton y W. Blanpied, Reidel, Boston, 1976. Un comentario más reciente viene dado por G. Holton, «How to Think About the “Anti-science Phenomenon”», *Public Understanding of Science*, 1 (1992), p. 103.

especialmente a la física) de «no sólo sexista sino también racista, clasista y culturalmente coercitiva<sup>lxxvi</sup>», y argumenta: «La física y la química, la matemática y la lógica, conservan las huellas de sus específicos creadores culturales de la misma forma que lo hacen la antropología y la historia<sup>lxxvii</sup>». Theodore Roszak insta a que cambiemos «la sensibilidad fundamental del pensamiento científico... incluso aunque tuviéramos que revisar drásticamente el carácter profesional de la ciencia y su lugar en nuestra cultura<sup>lxxviii</sup>». No parece que estas críticas radicales a la ciencia hayan tenido algún efecto sobre los propios científicos. No sé de ningún científico en activo que las considere seriamente<sup>lxxix</sup>. El peligro que suponen para la ciencia proviene de su posible influencia sobre aquellos que no han compartido el trabajo de la ciencia, pero de quienes dependemos, especialmente aquellos encargados de la financiación de la ciencia y de las nuevas generaciones de científicos potenciales. Recientemente, el ministro encargado de la financiación de la ciencia civil en Gran Bretaña era citado por la revista *Nature*<sup>lxxx</sup> por haber hablado en forma aprobatoria de un libro de Bryan Appleyard que tiene como lema el que la ciencia es hostil al espíritu humano<sup>lxxxii</sup>.

Sospecho que Gerald Holton está cerca de la verdad al ver el ataque radical a la ciencia como un síntoma de una hostilidad más amplia hacia la civilización occidental, una hostilidad que ha envenenado a los intelectuales occidentales desde Oswald Spengler en adelante<sup>lxxxii</sup>. La ciencia moderna constituye un blanco obvio para esta hostilidad; el gran arte y la gran literatura han surgido de



muchas de las civilizaciones del mundo pero, desde Galileo, la investigación científica ha estado abrumadoramente dominada por Occidente.

Creo que esta hostilidad está trágicamente equivocada. Incluso las más aterradoras aplicaciones occidentales de la ciencia, tales como las armas nucleares, representan sólo un ejemplo más de los incesantes esfuerzos de la humanidad para destruirse con cualquier tipo de armas que se puedan concebir. Si frente a esto sopesamos las aplicaciones beneficiosas de la ciencia y su papel en la liberación del espíritu humano, pienso que la ciencia moderna, junto con la democracia y la música de contrapunto, es algo que Occidente ha dado al mundo y de lo que debemos sentirnos especialmente orgullosos.

A la postre, esta cuestión desaparecerá. El método y el conocimiento científico moderno se han difundido rápidamente a países no occidentales como Japón y la India y, de hecho, se está extendiendo por todo el mundo. Podemos prever el día en que la ciencia ya no podrá ser identificada con Occidente, sino que será considerada como posesión compartida del género humano.

## Capítulo 7

### Blues del siglo XX

*Blues,  
blues del siglo XX,  
me están poniendo triste.  
Quién  
ha escapado a estos cansados  
blues del siglo XX<sup>109</sup>.*

NÖEL COWARD, Cavalcade

Siempre que hemos sido capaces de ir suficientemente lejos a lo largo de nuestras series de preguntas acerca de la fuerza y la materia, las respuestas se han encontrado en el modelo estándar de las partículas elementales. Y en todas las conferencias sobre física de altas energías desde finales de los setenta, los físicos experimentales han informado de un creciente acuerdo entre sus resultados y las predicciones del modelo estándar. Usted podría pensar que los físicos de altas energías deberían sentirse satisfechos, así que ¿por qué estamos tan tristes?

En primer lugar, el modelo estándar describe las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas nucleares débil y fuerte, pero deja fuera una cuarta fuerza, en realidad la primera de todas las fuerzas conocidas, la fuerza de la gravitación. Esta omisión no es un simple descuido; como veremos, existen obstáculos matemáticos

---

<sup>109</sup> [Blues, / Twentieth Century Blues, / Are getting me down. / Who's / Escaped those weary / Twentieth Century Blues].

formidables para describir la gravitación con el mismo lenguaje que utilizamos para describir las demás fuerzas en el modelo estándar, el lenguaje de la teoría cuántica de campos. En segundo lugar, aunque la fuerza nuclear fuerte está incluida en el modelo estándar, aparece de una forma bastante diferente de las fuerzas electromagnética y nuclear débil, y no como parte de una imagen unificada. En tercer lugar, aunque el modelo estándar trata las fuerzas electromagnética y nuclear débil de una forma unificada, existen diferencias obvias entre estas dos fuerzas. (Por ejemplo, en circunstancias ordinarias la fuerza nuclear débil es mucho más débil que la fuerza electromagnética). Tenemos una idea general de cómo surgen las diferencias entre las fuerzas electromagnética y débil, pero no comprendemos completamente el origen de estas diferencias. Finalmente, aparte del problema de unificar las cuatro fuerzas, muchas características del modelo estándar no están dictadas por principios fundamentales (como sería de desear), sino que más bien tienen que ser tomadas simplemente de la experiencia. Estas características aparentemente arbitrarias incluyen una lista de partículas, cierto número de constantes numéricas tales como las razones de las masas, e incluso las propias simetrías. Es fácil imaginar que cualquiera o todas estas características del modelo estándar podrían haber sido diferentes. Por supuesto, el modelo estándar supone una enorme mejora respecto a la mezcla de simetrías aproximadas, hipótesis dinámicas mal formuladas y simples hechos que mi generación de físicos tuvo que aprender en la universidad. Pero el modelo estándar claramente

no es la respuesta final, y para ir más allá tendríamos que solucionar todas sus debilidades.

Todos estos problemas del modelo estándar tienen que ver de una u otra forma con un fenómeno conocido como *ruptura espontánea de simetría*. El descubrimiento de este fenómeno ha sido uno de los grandes desarrollos liberadores de la ciencia del siglo xx; primero en la física de la materia condensada y más tarde en la física de las partículas elementales. Su mayor éxito lo constituyó la explicación de las diferencias entre las fuerzas débil y electromagnética, de modo que la teoría electrodébil será un buen lugar para que empecemos a echar una mirada al fenómeno de la ruptura espontánea de simetría.

La teoría electrodébil es la parte del modelo estándar que trata las fuerzas débil y electromagnética. Está basada en un principio de simetría *exacta*, que dice que las leyes de la naturaleza toman la misma forma si en todo lugar en las ecuaciones de la teoría reemplazamos los campos del electrón y del neutrino por campos combinados (por ejemplo, un campo que tenga un 30 por 100 de campo del electrón y un 70 por 100 de campo del neutrino u otro campo que tenga un 70 por 100 de campo del electrón y un 30 por 100 de campo del neutrino), y al mismo tiempo combinamos de forma análoga los campos de las otras familias de partículas tales como el quark *up* y el quark *down*. Este principio de simetría se denomina *local*, lo que quiere decir que las leyes de la naturaleza se suponen inalteradas incluso si estas combinaciones varían de un instante a otro o de una posición a otra. Hay otra familia de campos

cuya existencia viene *dictada* por este principio de simetría en una manera semejante a la forma en que la existencia del campo gravitatorio viene dictada por la simetría entre diferentes sistemas de coordenadas. Esta familia consta de los campos del fotón y de las partículas  $W$  y  $Z$ , y estos campos también deberían combinarse entre sí cuando combinamos los campos del electrón y del neutrino y los campos de los quarks. El intercambio de fotones es responsable de la fuerza electromagnética, mientras que el intercambio de partículas  $W$  y  $Z$  da lugar a la fuerza nuclear débil, de modo que esta simetría entre electrones y neutrinos es también una simetría entre la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil.

Pero ciertamente esta simetría no es manifiesta en la naturaleza, y ésta es la razón de que tardase tanto tiempo en ser descubierta. Por ejemplo, los electrones y las partículas  $W$  y  $Z$  tienen masa, pero los neutrinos y los fotones no la tienen<sup>110</sup>. (Es la gran masa de las partículas  $W$  y  $Z$  la que hace que las fuerzas débiles sean mucho más débiles que las fuerzas electromagnéticas). En otras palabras, la simetría que relaciona el electrón, el neutrino y demás es una propiedad de las ecuaciones subyacentes en el modelo estándar, ecuaciones que dictan las propiedades de las partículas elementales, pero esta simetría no es satisfecha por las *soluciones* de dichas ecuaciones, es decir, por las propiedades de las propias partículas.

---

<sup>110</sup> Es posible que los neutrinos e incluso los fotones tengan masas tan pequeñas que no hayan sido detectadas hasta ahora, pero estas masas serían muy diferentes de las masas de los electrones y de las partículas  $W$  y  $Z$ , que no es lo que sería de esperar si la simetría entre estas partículas fuese manifiesta en la naturaleza.

Para ver cómo las ecuaciones pueden tener una simetría aun cuando sus soluciones no la tienen, supongamos que nuestras ecuaciones fueran completamente simétricas respecto a dos tipos de partículas, tales como el quark *up* y el quark *down*, y que deseáramos resolver estas ecuaciones para encontrar las masas de las dos partículas. Uno podría suponer que la simetría entre los dos tipos de quarks impondría que las dos masas resultasen ser iguales, pero ésta no es la única posibilidad<sup>111</sup>. La simetría de las ecuaciones no descarta la posibilidad de que una solución resultante pudiera dar al quark *up* una masa mayor que la masa del quark *down*; sólo requiere que, en tal caso, debe haber una *segunda* solución de las ecuaciones en las que la masa del quark *down* es mayor que la masa del quark *up* y exactamente en la misma cantidad. Es decir, la simetría de las ecuaciones no está necesariamente reflejada en cada solución individual de dichas ecuaciones, sino sólo en el conjunto de *todas* las soluciones de estas ecuaciones. En este ejemplo sencillo, las propiedades reales de los quarks corresponderían a una u otra de las dos soluciones, representando una ruptura de la simetría de la teoría subyacente. Nótese que no es realmente importante cuál de las dos soluciones se dé en la naturaleza; si la única diferencia entre los quarks *up* y *down* residiera en sus masas, entonces la diferencia entre las dos soluciones sería simplemente

---

<sup>111</sup> Por ejemplo, una ecuación que dice que el cociente entre las masas del quark *up* y el quark *down* más el cociente entre las masas del quark *down* y el quark *up* es igual a 2,5 es evidentemente simétrica respecto a los dos quarks. Tiene dos soluciones: en una solución, la masa del quark *up* es doble que la masa del quark *down*, y en la otra solución la masa del quark *down* es doble que la masa del quark *up*. No hay ninguna solución en la que las masas sean iguales, puesto que en tal caso ambos cocientes serían igual a 1 y su suma sería 2 y no 2,5.

una cuestión de qué quark elegimos como *up* y cuál elegimos como *down*. La naturaleza tal como la conocemos representa sólo una solución de todas las ecuaciones del modelo estándar, y no supone ninguna diferencia *qué* solución sea con tal de que todas las diferentes soluciones estén relacionadas mediante principios de simetría exacta.

En tales casos decimos que la simetría está rota, aunque un término mejor sería «oculta», porque la simetría permanece en las ecuaciones y estas ecuaciones gobiernan las propiedades de las partículas. Llamamos a este fenómeno una *ruptura espontánea de simetría*, porque nada rompe la simetría en las ecuaciones de la teoría; la ruptura de simetría aparece espontáneamente en las diversas soluciones de estas ecuaciones.

Son los principios de simetría los que dan gran parte de su belleza a nuestras teorías. Por este motivo resultó tan excitante que los físicos de partículas elementales comenzaron a reflexionar acerca de la ruptura espontánea de simetría, a comienzos de los años sesenta. Repentinamente nos dimos cuenta de que existe mucha más simetría en las leyes de la naturaleza de la que uno conjeturaría por la simple observación de las propiedades de las partículas elementales. La simetría rota es una noción muy platónica: la realidad que observamos en nuestros laboratorios es solamente un reflejo imperfecto de una realidad más profunda y más bella, la realidad de las ecuaciones que exhiben todas las simetrías de la teoría.

Un imán permanente ordinario proporciona un buen ejemplo

práctico de una simetría rota. (Este ejemplo resulta particularmente apropiado porque la ruptura espontánea de simetría apareció por primera vez en física cuántica en la teoría de Heisenberg de 1928 sobre el magnetismo permanente). Las ecuaciones que gobiernan los átomos de hierro y el campo magnético en un imán son perfectamente simétricas con respecto a las direcciones espaciales; nada en estas ecuaciones distingue el norte del sur o del este o de arriba. Pero cuando un trozo de hierro se enfría por debajo de los 770 °C, espontáneamente desarrolla un campo magnético que apunta en alguna dirección concreta, rompiendo la simetría entre las diferentes direcciones<sup>112</sup>. Una raza de seres diminutos que hubieran nacido y pasado toda su vida en el interior de un imán permanente necesitaría mucho tiempo para darse cuenta de que las leyes de la naturaleza poseen realmente una simetría con respecto a las diferentes direcciones del espacio, y que, si parece haber una dirección preferida en su medio ambiente, es sólo debido a que los espines de los átomos de hierro se han alineado espontáneamente en una misma dirección, produciendo un campo magnético.

Nosotros, al igual que los seres diminutos del imán, hemos descubierto recientemente una simetría que resulta estar rota en

---

<sup>112</sup> La dirección de este campo magnético está determinada por cualquier campo magnético externo que pudiera estar presente, tal como el campo magnético de la Tierra; lo importante es que la intensidad del magnetismo desarrollado en el hierro es la misma por muy débil que sea el campo externo. En ausencia de cualquier campo magnético externo fuerte, la dirección del magnetismo es diferente en los diferentes «dominios» dentro del hierro, y los campos magnéticos que aparecen espontáneamente dentro de los dominios individuales se cancelan para el imán en conjunto. Se puede conseguir que los dominios se alineen exponiendo el hierro enfriado a un campo magnético externo fuerte y la magnetización persistirá incluso cuando se retire el campo magnético.



nuestro universo<sup>113</sup>. Es la simetría que relaciona las fuerzas débil y electromagnética, cuya ruptura se manifiesta, por ejemplo, en las disimilitudes entre las masas del fotón y las de las muy pesadas partículas  $W$  y  $Z$ . Una gran diferencia entre la ruptura de simetría en el modelo estándar y en un imán es que el origen de la magnetización está bien entendido. Se debe a que las fuerzas electromagnéticas conocidas entre átomos vecinos en el hierro tienden a alinear sus espines paralelamente a los de los demás. El modelo estándar es más misterioso. Ninguna de las fuerzas conocidas del modelo estándar es lo bastante fuerte como para ser responsable de la ruptura de simetría observada entre las fuerzas débil y electromagnética. Lo más importante que seguimos sin saber sobre el modelo estándar es precisamente la causa de la ruptura de la simetría electrodébil.

En la versión original de la teoría estándar de las fuerzas débil y electromagnética, la ruptura de la simetría entre estas fuerzas se atribuía a un nuevo campo introducido en la teoría precisamente con este propósito. Se suponía que este campo aparecía espontáneamente como el campo magnético en un imán permanente, apuntando en una dirección definida que, en este caso, no es una dirección en el espacio ordinario, sino más bien una dirección en las pequeñas esferas de reloj imaginarias que distinguen los electrones de los neutrinos, los fotones de las

---

<sup>113</sup> Esta simetría no está completamente rota; existe una simetría remanente sin romper (conocida como invariancia gauge electromagnética) que dicta que el fotón debe tener masa nula. Esta simetría remanente se rompe en un superconductor. En realidad, en eso consiste un superconductor en esencia no es nada más que un trozo de materia en el que se ha roto la invariancia gauge electromagnética.

partículas  $W$  y  $Z$ , y así sucesivamente. El valor del campo que rompe la simetría se denomina normalmente *valor de vacío*, debido a que el campo toma este valor en el vacío, lejos de la influencia de cualquier partícula. Después de un cuarto de siglo todavía no sabemos si esta imagen sencilla de la ruptura de simetría es correcta, pero sigue siendo la posibilidad más plausible.

Ésta no es la primera vez que los físicos han propuesto la existencia de un nuevo campo o partícula para satisfacer algún requisito teórico. A comienzos de los años treinta, los físicos estaban preocupados por una aparente violación de la ley de la conservación de la energía cuando un núcleo radiactivo sufre el proceso conocido como desintegración beta. En 1932 Wolfgang Pauli propuso la existencia de una partícula conveniente, que llamó neutrino, para dar cuenta de la energía que, según las observaciones, se perdía en este proceso. El evasivo neutrino acabó siendo hallado experimentalmente unas dos décadas más tarde<sup>114</sup>. Proponer la existencia de algo que todavía no ha sido observado es una empresa arriesgada, pero a veces funciona.

Como cualquier otro campo en una teoría mecanocuántica, este nuevo campo responsable de la ruptura de simetría electrodébil tendría una energía y un momento que vienen en paquetes, conocidos como cuantos. La teoría electrodébil nos dice que al menos uno de estos cuantos debería ser observable como una nueva partícula elemental. Varios años antes de que Salam y yo desarrolláramos una teoría de las fuerzas débil y electromagnética

---

<sup>114</sup> Por C. L. Cowan y F. Reines.

basada en la ruptura espontánea de simetría, algunos teóricos habían ya descrito la matemática de ejemplos más sencillos de este tipo de ruptura de simetría<sup>115</sup>; muy en particular, Peter Higgs de la Universidad de Edimburgo en 1964. Por esta razón, la nueva partícula que se necesita en la versión original de la teoría electrodébil ha llegado a ser conocida como *partícula de Higgs*.

Nadie ha descubierto una partícula de Higgs, pero esto no contradice la teoría; una partícula de Higgs podría no haber sido vista en ningún experimento realizado hasta la fecha si su masa fuese mayor que alrededor de 50 veces la masa del protón, lo que muy bien podría suceder. (Por desgracia, la teoría electrodébil no dice nada sobre la masa de la partícula de Higgs, excepto que, casi con seguridad, no debería ser más pesada que un billón de voltios, unas mil veces la masa del protón). Necesitamos experimentos que nos digan si realmente existe una partícula de Higgs, o quizá varias partículas de Higgs, y suministrarnos sus masas.

La importancia de estas cuestiones va más allá de la cuestión concreta de cómo se rompe la simetría electrodébil. Algo nuevo que aprendimos de la teoría electrodébil es que todas las partículas del modelo estándar, dejando aparte la partícula de Higgs, adquieren sus masas a partir de la ruptura de la simetría entre las fuerzas débil y electromagnética. Si de alguna forma pudiéramos desactivar esta ruptura de simetría, entonces el electrón y las partículas  $W$  y  $Z$  y todos los quarks quedarían sin masa, como el fotón y el neutrino. El problema de comprender las masas de las partículas elementales

---

<sup>115</sup> Incluyendo a F. Englert y R. Brout, y G. S. Guralnik, C. R. Hagen y T. W. B. Kibble.

conocidas es, por consiguiente, una parte del problema de comprender el mecanismo mediante el cual la simetría electrodébil se rompe espontáneamente. En la versión original del modelo estándar, la partícula de Higgs es la única partícula cuya masa aparece directamente en las ecuaciones de la teoría; la ruptura de la simetría electrodébil da a todas las demás partículas masas que son proporcionales a la masa de la partícula de Higgs. Pero no tenemos evidencia de que las cosas sean tan sencillas.

El problema de la causa de la ruptura de la simetría electrodébil no es sólo importante para la física, sino también para nuestros intentos de entender la temprana historia de nuestro universo. De la misma forma que la magnetización de un trozo de hierro puede ser anulada, y la simetría entre las diferentes direcciones restaurada, elevando la temperatura del hierro por encima de los 770 °C, también la simetría entre las fuerzas débil y electromagnética podría ser restaurada si pudiéramos elevar la temperatura de nuestro laboratorio por encima de unos pocos miles de billones de grados. A tales temperaturas, la simetría ya no estaría oculta, sino que se manifestaría claramente en las propiedades de las partículas del modelo estándar. (Por ejemplo, a estas temperaturas, el electrón y las partículas  $W$  y  $Z$  y todos los quarks no tendrían masa). Temperaturas del orden de mil billones de grados no pueden ser producidas en el laboratorio y ni siquiera existen hoy en el centro de las estrellas más calientes. Pero, según la versión más sencilla de la teoría cosmológica del *big bang* generalmente aceptada, existió un momento en el pasado, hace

entre diez y veinte mil millones de años, en el que la temperatura del universo era infinita. Alrededor de una diez mil millonésima de segundo después de este instante inicial la temperatura del universo cayó hasta unos pocos miles de billones de grados y, en este instante, la simetría entre las fuerzas débil y electromagnética se rompió.

Probablemente esta ruptura de simetría no sucedió de forma instantánea y uniforme. En las «transiciones de fase» más familiares, tales como la congelación del agua o la magnetización del hierro, la transición puede ocurrir un poco antes o un poco después en un punto que en otro, y puede no ocurrir de la misma forma en todas partes, como vemos por ejemplo en la formación de pequeños cristales de hielo separados o en la formación de dominios distintos en un imán, en cada uno de los cuales la magnetización apunta en direcciones diferentes. Este tipo de complicación en la transición de fase electrodébil podría haber tenido varios efectos detectables, por ejemplo, en las abundancias de elementos ligeros que se formaron algunos minutos más tarde. Pero no podemos evaluar estas posibilidades hasta que sepamos el mecanismo por el cual la simetría electrodébil se rompió.

Sabemos que hay una simetría rota entre las fuerzas débil y electromagnética porque la teoría que está basada en esta simetría *funciona*: hace muchas predicciones correctas sobre las propiedades de las partículas  $W$  y  $Z$  y sobre las fuerzas que ellas transmiten. Pero no estamos realmente seguros de que la simetría electrodébil esté rota por el valor de vacío de algún campo en la teoría o de que

exista una partícula de Higgs. *Algo* tiene que ser incluido en la teoría electrodébil para romper esta simetría, pero es posible que la ruptura de la simetría electrodébil sea debida a efectos indirectos de algún nuevo tipo de fuerza extrafuerte que no actúe sobre los quarks o electrones o neutrinos ordinarios y que, por esta razón, todavía no haya sido detectada<sup>116</sup>. Teorías de este tipo fueron desarrolladas a finales de los años setenta, pero tienen sus propios problemas<sup>117</sup>. Una de las misiones clave del Supercolisionador Superconductor ahora en construcción es dilucidar este punto.

Éste no es el final de la historia de la ruptura espontánea de simetría. La idea de ruptura espontánea de simetría ha desempeñado también un papel en nuestros esfuerzos para incluir la tercera fuerza del modelo estándar, la fuerza nuclear fuerte, dentro del mismo marco unificado que las fuerzas débil y electromagnética. Aunque las diferencias obvias entre las fuerzas débil y electromagnética se explican en el modelo estándar como resultado de la ruptura espontánea de simetría, esto no es cierto

---

<sup>116</sup> Esta nueva fuerza daría lugar a que *productos* de los campos de cualquier partícula que sienta la fuerza desarrollasen valores de vacío que romperían la simetría electrodébil, incluso aunque los valores de vacío de los campos individuales sean todos nulos. (Es una característica familiar de las probabilidades el que un producto de cantidades pueda tener un valor promedio no nulo incluso cuando los valores medios de las cantidades individuales son nulos. Por ejemplo, la altura media de las olas del océano sobre el nivel medio del mar es por definición cero, pero el *cuadrado* de la altura de las ondas del océano, es decir, el producto de la altura por sí mismo, tiene un valor medio distinto de cero). Esta nueva fuerza podría haber escapado a la detección si actúa sólo sobre partículas hipotéticas que son demasiado pesadas para haber sido descubiertas.

<sup>117</sup> Estas teorías fueron desarrolladas independientemente por Lenny Susskind de Stanford y yo mismo. Para distinguir el nuevo tipo de fuerza extrafuerte que se necesita en tales teorías de las familiares fuerzas «de color» fuertes que confinan a los quarks en el interior del protón, la nueva fuerza ha sido llamada *technicolor*, nombre debido a Susskind. El problema de la idea del technicolor es que no explica las masas de los quarks, electrones, etc. Es posible dar masas a estas partículas y evitar el conflicto con el experimento mediante diversas elaboraciones de la teoría, pero entonces la teoría se hace tan barroca y artificial que es difícil considerarla seriamente.

para la fuerza nuclear fuerte; ni siquiera existe simetría en las ecuaciones del modelo estándar que relacionan las fuerzas nucleares fuertes con las fuerzas débil y electromagnética. Desde principios de los años setenta, esto llevó a la búsqueda de una teoría subyacente al modelo estándar en la que tanto las interacciones fuertes como la débil y la electromagnética quedaran unificadas mediante un único y gran grupo de simetrías espontáneamente rotas<sup>118</sup>.

Había un obstáculo obvio para cualquier tipo de unificación que siguiera estas líneas. Las intensidades aparentes de las fuerzas en cualquier teoría de campos dependen de dos tipos de parámetros numéricos: las masas (si las hay) de las partículas como las partículas  $W$  y  $Z$ , que transmiten las fuerzas, y ciertas *intensidades intrínsecas* (también conocidas como constantes de acoplamiento), que caracterizan la probabilidad de que partículas como los fotones o gluones o las partículas  $W$  y  $Z$  sean emitidas y reabsorbidas en las reacciones entre partículas. Las masas surgen de la ruptura espontánea de simetría, pero las intensidades intrínsecas son números que aparecen en las ecuaciones subyacentes en la teoría. Cualquier simetría que conecte la fuerza fuerte con las fuerzas débil y electromagnética, incluso si está espontáneamente rota, impondría que las intensidades intrínsecas de las fuerzas electrodébil y fuerte fueran (con los convenios apropiados en cuanto a su definición) todas iguales. Las diferencias aparentes entre las

---

<sup>118</sup> Las teorías que unifican la interacción fuerte con la electrodébil se denominan a menudo teorías de gran unificación. Teorías específicas de este tipo fueron propuestas por Jogesh Pati y Abdus Salam; Howard Georgi y Sheldon Glashow; y H. Georgi; y luego por muchos otros.

intensidades de las fuerzas tendrían que ser atribuidas a rupturas espontáneas de simetría que dan lugar a diferencias en las masas de las partículas que transmiten las fuerzas, de forma muy parecida a cómo las fuerzas electromagnética y débil aparecen en el modelo estándar por el hecho de que la ruptura de simetría electrodébil da masas muy grandes a las partículas  $W$  y  $Z$ , mientras que el fotón queda sin masa. Pero es evidente que las intensidades intrínsecas de la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electromagnética *no* son iguales; la fuerza nuclear fuerte, como su nombre sugiere, es mucho más fuerte que la fuerza electromagnética, incluso aunque ambas fuerzas sean transmitidas por partículas sin masa, los gluones y los fotones.

En 1974 surgió una idea que ofrecía un camino para evitar este obstáculo<sup>119</sup>. Las intensidades intrínsecas de todas estas fuerzas en realidad dependen de forma muy débil de las energías de los procesos en los que se miden. En cualquier tipo de teoría que unifica las fuerzas fuertes con las electrodébiles sería de esperar que estas intensidades intrínsecas se hicieran iguales a una *cierta* energía, pero esta energía podría ser muy diferente de las energías de los experimentos actuales. Existen tres intensidades intrínsecas independientes para las fuerzas en el modelo estándar (ésta es una de las razones por las que no nos satisface como teoría final), de modo que la condición de que debería haber *una* energía a la que todas las intensidades se hiciesen iguales no es una condición trivial. Imponiendo esta condición era posible hacer una predicción

---

<sup>119</sup> Este fue el trabajo de Howard Georgi, Helen Quinn y yo mismo.



que relacionase las intensidades que deberían tener las fuerzas con las energías de los experimentos existentes, una predicción que resultó estar en razonable acuerdo con el experimento<sup>120</sup>. Esto es sólo un éxito cuantitativo aislado, pero es suficiente para animarnos a profundizar en estas ideas.

También era posible estimar de este modo la energía a la que las intensidades intrínsecas de las fuerzas se harían iguales. La fuerza nuclear fuerte es mucho más fuerte que las otras fuerzas a las energías de los aceleradores existentes y, según la cromodinámica cuántica, se debilita muy lentamente a medida que aumenta la energía, de modo que el valor predicho de la energía a la que todas las fuerzas del modelo estándar se hacen igualmente fuertes es muy alto: se calcula que debe estar por encima de un billón de billones de voltios. (Actualizaciones recientes de este cálculo sugieren una energía más próxima a los diez billones de billones de voltios). Si realmente hubiera alguna simetría espontáneamente rota que ligara las fuerzas fuerte y electrodébil, entonces tendrían que existir nuevas partículas pesadas para completar la familia de las partículas portadoras de fuerza que acompañan a las  $W$ ,  $Z$ , fotones y gluones. En este caso, la energía de algunos billones de billones de voltios podría identificarse como la energía contenida en la masa de

---

<sup>120</sup> Más exactamente, es sólo el cociente de estas intensidades lo que se predice. Cuando fue hecha esta predicción en 1974 pareció al principio un fallo; se predecía que este cociente debía ser 0,22, pero los experimentos sobre dispersión de neutrinos mostraron que, en su lugar, tenía un valor de aproximadamente 0,35. Conforme ha pasado el tiempo, desde mediados de los años setenta, el valor experimental para este cociente ha disminuido, y ahora está bastante próximo al valor esperado de 0,22. Pero tanto las mediciones como los cálculos teóricos son ahora tan precisos que podemos ver que existe una discrepancia de varios tantos por ciento entre ellos. Como veremos, existen teorías (que incorporan la simetría conocida como supersimetría) que resuelven esta discrepancia remanente de una forma muy natural.

estas nuevas partículas pesadas. Como veremos, en las teorías de supercuerdas actuales no hay necesidad de suponer la existencia de una nueva simetría independiente que ligue las fuerzas fuerte y electrodébil, y aun así sigue siendo válido el que las intensidades intrínsecas de las fuerzas fuerte y electrodébil se harían todas iguales a alguna energía muy alta, que se calcula en unos diez mil billones de billones de voltios.

Esto puede parecer simplemente otro número indigeriblemente grande, pero, cuando en 1974 se hizo esta estimación de un billón de billones de voltios, sonó como campanas en las cabezas de los físicos teóricos. Todos nosotros conocíamos otra energía muy alta, que aparece de forma natural en cualquier teoría que intente unificar la gravitación con las demás fuerzas de la naturaleza. En condiciones ordinarias la fuerza gravitatoria es mucho más débil que las fuerzas débil, fuerte y electromagnética. Nadie ha observado todavía ningún efecto de las fuerzas gravitatorias entre partículas en el interior de un átomo o molécula, y no hay mucha esperanza de que alguien lo observe alguna vez. (La única razón por la que la gravitación se nos manifiesta como una fuerza más bien fuerte en nuestras vidas cotidianas es que la Tierra contiene un gran número de átomos, y cada uno de ellos contribuye en una minúscula cantidad al campo gravitatorio en la superficie terrestre). Pero, según la relatividad general, la gravitación es producida por la energía y actúa sobre la energía de la misma forma que ocurre con la masa. Éste es el motivo por el que los fotones que tienen energía, pero no masa son desviados por el campo gravitatorio del Sol. A

energías suficientemente altas la fuerza gravitatoria entre dos partículas elementales típicas se hace tan fuerte como cualquier otra fuerza entre ellas. La energía a la que esto sucede es de alrededor de mil billones de billones de voltios. Ésta se conoce como la energía de Planck<sup>121</sup>.

Resulta sorprendente que la energía de Planck sea solamente unas cien veces mayor que la energía a la que las intensidades intrínsecas de las fuerzas fuerte y electrodébil se hacen iguales, incluso aunque ambas energías sean enormemente mayores que las energías que normalmente aparecen en la física de partículas elementales. El hecho de que estas dos enormes energías estén tan relativamente próximas sugiere decididamente que la ruptura de cualquier simetría que una las fuerzas fuerte y electrodébil es sólo parte de una ruptura de simetría más fundamental: la ruptura de cualquier simetría que relacione la gravitación con las demás fuerzas de la naturaleza. Puede que no exista una teoría unificada independiente para las fuerzas fuerte, débil y electromagnética, sino sólo una teoría unificada que verdaderamente englobe la gravitación junto con las fuerzas fuerte, débil y electromagnética.

Por desgracia, la razón de que la gravitación quede fuera del modelo estándar es que resulta muy difícil describir la gravitación en el lenguaje de la teoría cuántica de campos. Podemos simplemente aplicar las reglas de la mecánica cuántica a las ecuaciones de campo de la relatividad general, pero entonces entramos en el viejo

---

<sup>121</sup> En 1899 Max Planck observó en efecto que ésta es la unidad natural de energía que puede ser calculada a partir del conocimiento de la velocidad de la luz, la constante que posteriormente llevó su nombre, y la constante de Newton que aparece en la fórmula de la fuerza gravitatoria.

problema de los infinitos. Por ejemplo, si tratamos de calcular las probabilidades de lo que sucede en una colisión entre dos gravitones (las partículas que constituyen un campo gravitatorio), obtenemos contribuciones perfectamente razonables del intercambio de un gravitón entre los gravitones que colisionan, pero, si continuamos nuestros cálculos un paso más y tenemos en cuenta el intercambio de dos gravitones, empezamos a encontrar probabilidades infinitas. Estos infinitos pueden cancelarse si modificamos las ecuaciones de campo de Einstein introduciendo un nuevo término con un factor constante infinito que cancele el primer infinito, pero entonces al incluir el intercambio de *tres* gravitones en nuestros cálculos tropezamos con nuevos infinitos, que pueden ser cancelados añadiendo aún más términos a las ecuaciones de campo, y así sucesivamente, hasta que terminamos en una teoría con un número ilimitado de constantes desconocidas. Una teoría de este tipo es realmente útil para calcular procesos cuánticos a energías relativamente bajas, donde los nuevos términos añadidos a las ecuaciones del campo son despreciablemente pequeños, pero pierde todo poder predictivo cuando la aplicamos a los fenómenos gravitatorios a la energía de Planck. Por el momento, el cálculo de procesos físicos a la energía de Planck está sencillamente fuera de nuestro alcance.

Por supuesto, nadie está estudiando procesos a la energía de Planck de forma experimental (o en realidad midiendo cualquier proceso de gravitación cuántica como las colisiones gravitón-gravitón a cualquier energía), pero para que una teoría pueda ser considerada

satisfactoria no sólo debe de estar de acuerdo con los resultados de los experimentos ya realizados, sino que también debe hacer predicciones cuando menos plausibles para experimentos que en principio podrían ser realizados. A este respecto, la relatividad general estuvo durante años en la misma posición en la que estuvo la teoría de las interacciones débiles antes del desarrollo de la teoría electrodébil a finales de los años sesenta: la relatividad general funciona muy bien allí donde puede ser verificada experimentalmente, pero contiene contradicciones internas que muestran que necesita una modificación.

El valor de la energía de Planck nos enfrenta a un nuevo y formidable problema. No se trata solamente de que esta energía sea tan grande; surge en física a un nivel tan profundo que podemos suponer que la energía de Planck es sencillamente la unidad fundamental de energía que aparece en las ecuaciones de la teoría final. El misterio está en *por qué todas las demás energías son tan pequeñas*. En particular, en la versión original del modelo estándar las masas del electrón y las partículas  $W$  y  $Z$  y todos los quarks son proporcionales a la única masa que aparece en las ecuaciones del modelo, la masa de la partícula de Higgs. Por lo que sabemos de las masas de las partículas  $W$  y  $Z$  podemos inferir que la energía de la masa de una partícula de Higgs no podría ser mayor que alrededor de un billón de voltios. Pero ésta es al menos cien billones de veces más pequeña que la energía de Planck. Esto significa también que existe una jerarquía de simetrías: cualquiera que sea la simetría que unifica las fuerzas gravitatoria y nuclear fuerte con las fuerzas

electrodébiles se rompe aproximadamente cien billones de veces más fuertemente que la simetría que unifica las interacciones débiles y electromagnéticas. El rompecabezas de explicar esta enorme diferencia en las energías fundamentales se conoce, por consiguiente, en la física de partículas elementales actual como el *problema de la jerarquía*.

Durante quince años el problema de la jerarquía ha sido el hueso más duro de roer de la física teórica. Mucha de la especulación teórica de los años recientes ha sido impulsada por la necesidad de resolver este problema. No es una paradoja; no hay razón por la que algunas energías en las ecuaciones fundamentales de la física *no* puedan ser cien billones de veces más pequeñas que otras, pero es un misterio. Esto es lo que lo hace tan difícil. Una paradoja como un asesinato en una habitación cerrada puede sugerir su propia solución, pero un simple misterio nos fuerza a buscar las claves más allá del propio problema.

Una aproximación al problema de la jerarquía se basa en la idea de un nuevo tipo de simetría, conocido como *supersimetría*, que relaciona partículas de diferente espín de modo que forman nuevas «superfamilias<sup>122</sup>». En las teorías supersimétricas existen varias partículas de Higgs, pero la simetría prohíbe la aparición de cualquier masa de partículas de Higgs en las ecuaciones

---

<sup>122</sup> La supersimetría fue introducida como una hipótesis fascinante por Julius Wess y Bruno Zumino en 1974, pero su valor potencial para resolver el problema de la jerarquía ha sido responsable de gran parte del interés que desde entonces ha despertado. (Versiones de la supersimetría habían aparecido ya en artículos anteriores de Yu. A. Gol'fand y E. P. Likhtman y de D. V. Volkov y V. P. Akulov, pero su significado físico no había sido explorado en estos artículos y atrajo poca atención. Wess y Zumino sacaron al menos parte de su inspiración del trabajo en teoría de cuerdas de 1971 a cargo de P. Ramond, A. Neveu y J. H. Schwarz y J.-L. Gervais y B. Sakita).

fundamentales de la teoría; lo que llamamos las masas de la partícula de Higgs en el modelo estándar tendrían que aparecer a partir de complicados efectos dinámicos que rompen la supersimetría<sup>123</sup>. En otro enfoque antes mencionado abandonamos la idea de un campo cuyo valor de vacío rompe la simetría electrodébil y atribuye esta ruptura de simetría más bien a los efectos de alguna nueva fuerza extrafuerte<sup>124</sup>.

Por desgracia, hasta el momento no hay ningún signo de supersimetría o de nuevas fuerzas extrafuertes en la naturaleza<sup>125</sup>.

---

<sup>123</sup> Hasta la llegada de la supersimetría se pensaba que sería imposible que cualquier simetría prohibiera tales masas. La ausencia de masa para partículas como los quarks y los electrones y los fotones, partículas  $W$  y  $Z$ , y gluones en las ecuaciones de la versión original del modelo estándar está ligada inseparablemente al hecho de que estas partículas tienen espín. (El fenómeno familiar de la luz polarizada es un efecto directo del espín del fotón). Pero para que un campo tenga valor de vacío distinto de cero que rompa la simetría electrodébil, el campo no debe tener espín; si lo tuviera, su valor de vacío también rompería la simetría del vacío con respecto a cambios de dirección, en abierta contradicción con la experiencia. La supersimetría resuelve este problema estableciendo una relación entre un campo sin espín, cuyo valor de vacío rompe la simetría electrodébil, y los diversos campos que tienen espín y a los que la simetría electrodébil prohíbe tener masas en las ecuaciones del campo. Las teorías de la supersimetría tienen sus propios problemas: las supercompañeras de las partículas conocidas no han sido descubiertas, de modo que deben ser muy pesadas y, por lo tanto, la propia supersimetría debe ser una simetría rota. Existen varias sugerencias interesantes para el mecanismo que rompe la supersimetría, algunas de ellas incluyendo la fuerza de gravedad, pero hasta el momento la cuestión está abierta.

<sup>124</sup> Una versión del modelo estándar basada en la introducción de nuevas fuerzas (de technicolor) extrafuertes evitaría el problema de la jerarquía porque no habría masas en las ecuaciones que describen la física a energías muy por debajo de la energía de Planck. La escala de las masas de las partículas  $W$  y  $Z$  y las demás partículas elementales del modelo estándar estaría relacionada en su lugar con la forma en que la intensidad del technicolor cambia con la energía. Sería de esperar que la fuerza de technicolor tanto como las fuerzas fuerte y electrodébil tuvieran la misma intensidad intrínseca a alguna energía muy alta, no muy diferente de la energía de Planck. A medida que decreciera la energía, su intensidad aumentaría muy lentamente, de modo que la fuerza de technicolor no llegaría a ser suficientemente fuerte para romper ninguna simetría hasta que la energía cayese a un valor mucho más pequeño que la energía de Planck. Es bastante plausible que, sin ningún ajuste fino de las constantes de la teoría, a medida que la energía decreciera la fuerza de technicolor se haría más fuerte algo más rápidamente que la fuerza de color ordinaria, de modo que podría dar algo parecido a las masas observadas de las partículas  $W$  y  $Z$  del modelo estándar; mientras que si la fuerza de color ordinaria actuase sola, les daría masas mil veces más pequeñas.

<sup>125</sup> La supersimetría exige que todos los quarks conocidos y los fotones y demás partículas tengan «supercompañeras» de espín diferente. Incluso aunque no se haya visto ninguna de éstas, esto no ha detenido a los teóricos a dar nombres a todas estas partículas: las supercompañeras (con espín nulo) de partículas como los quarks, electrones y neutrinos se

Este hecho no es todavía un argumento concluyente en contra de estas ideas; las nuevas partículas predichas por estas aproximaciones al problema de la jerarquía muy bien podrían ser demasiado pesadas para haber sido producidas en los aceleradores existentes.

Esperamos que las partículas de Higgs o las nuevas partículas requeridas por las diversas aproximaciones al problema de la jerarquía puedan ser descubiertas en los nuevos y suficientemente potentes aceleradores de partículas, como el Supercolisionador Superconductor. Pero no hay forma en la que cualquier acelerador que podamos imaginar hoy día sea capaz de concentrar en partículas individuales las enormes energías a las que todas las fuerzas se unifican. Cuando Demócrito y Leucipo especulaban sobre los átomos en Abdera, no podían conjeturar que estos átomos fueran un millón de veces más pequeños que los granos de arena de las playas del mar Egeo o que pasarían 2300 años antes de encontrar pruebas directas de la existencia de átomos. Nuestras especulaciones nos han llevado actualmente a la orilla de un mar mucho más ancho: pensamos que todas las fuerzas de la naturaleza

---

denominan squarks, selectrones y sneutrinos, y así sucesivamente, mientras que las supercompañeras (con espín un medio) del fotón,  $W$ ,  $Z$  y gluones se denominan fotino, wino, zino y gluinos. Una vez propuse llamar a esta jerga un «lenguino», pero Murray Gell-Mann ha sugerido un término mejor: es un «slenguaje». [Juego de palabras intraducible: al colocar una  $s$  delante de la palabra *language* se obtiene la palabra *slang* (argot, jerga). (*N. del t.*)] Muy recientemente la idea de la supersimetría ha recibido un empujón muy importante de los experimentos sobre desintegración de la partícula  $Z$  en el Laboratorio del CERN en Ginebra. Como se mencionó antes, estos experimentos son ahora tan precisos que es posible decir que existe una pequeña discrepancia (en torno al 5 por 100) entre la razón de 0,22 predicha en 1974 para la intensidad de la interacción y el valor real. Resulta muy interesante que los cálculos muestran que la presencia de squarks y gluinos, y todas las demás nuevas partículas que requiere la supersimetría, cambiarían la forma en que la intensidad de la interacción cambia con la energía justo lo suficiente para volver a poner de acuerdo la teoría y el experimento.



se unificarán a una energía del orden de la energía de Planck, un billón de veces mayor que la energía más alta alcanzada en los aceleradores actuales.

El descubrimiento de este enorme mar ha cambiado la física en formas que van más allá del problema de la jerarquía. Por una parte, ha arrojado una nueva luz sobre el viejo problema de los infinitos. En el modelo estándar, como en la vieja electrodinámica cuántica, la emisión y absorción de fotones y otras partículas de energía ilimitadamente alta da contribuciones infinitas a las energías atómicas y otras magnitudes observables. Para manejar estos infinitos, al modelo estándar se le exigió tener la propiedad especial de ser renormalizable; es decir, que todos los infinitos de la teoría deberían cancelarse con otros infinitos que aparecen en la definición de las masas desnudas y otras constantes que entran en las ecuaciones de la teoría. Esta condición fue una guía poderosa en la construcción del modelo estándar; sólo las teorías con las ecuaciones de campo más sencillas posibles son renormalizables. Pero, debido a que el modelo estándar deja fuera la gravitación, pensamos ahora que es simplemente una aproximación válida a baja energía a una teoría unificada realmente fundamental y que pierde su validez a energías como la energía de Planck. ¿Por qué entonces deberíamos tomar en serio lo que nos dice sobre los efectos de la emisión y absorción de partículas de energía ilimitadamente alta? Y si no lo tomamos en serio, ¿por qué deberíamos exigir que el modelo estándar sea renormalizable? El problema de los infinitos no ha desaparecido, sino que es un

problema para la teoría final, no para una aproximación a baja energía como parece ser el modelo estándar.

Como resultado de esta reaparición del problema de los infinitos, pensamos ahora que las ecuaciones de campo del modelo estándar no son del tipo muy simple que sería renormalizable, sino que realmente contienen cualquier término concebible que sea consistente con las simetrías de la teoría. Pero entonces debemos explicar por qué las viejas teorías cuánticas de campos renormalizables, como las versiones más sencillas de la electrodinámica cuántica o el modelo estándar, funcionan tan bien. La razón, pensamos, puede estar en el hecho de que todos los términos en las ecuaciones del campo, aparte de los términos renormalizables muy simples, aparecen necesariamente en estas ecuaciones divididos por potencias de alguna cantidad del orden de la energía de Planck. El efecto de estos términos en cualquier proceso físico observado sería entonces proporcional a potencias de la razón entre la energía del proceso y la energía de Planck, una razón quizá tan pequeña como una parte en mil billones. Éste es un número tan minúsculo que naturalmente ningún efecto semejante ha sido detectado. En otras palabras, la condición de renormalizabilidad que guio nuestro pensamiento desde la electrodinámica cuántica de los años cuarenta hasta el modelo estándar de los años sesenta y setenta fue una condición correcta para propósitos prácticos, aunque fue impuesta por razones que ya no parecen relevantes.

Este cambio en el punto de vista tiene consecuencias de gran

importancia potencial. El modelo estándar en su forma renormalizable más sencilla contenía ciertas leyes de conservación «accidentales», además de las leyes de conservación realmente fundamentales que se siguen de las simetrías de la relatividad especial y de las simetrías internas que dictan la existencia del fotón, las partículas  $W$  y  $Z$  y los gluones. Entre estas leyes de conservación accidentales están la conservación del número de quarks (el número total de quarks menos el número total de antiquarks) y el número leptónico (el número total de electrones y neutrinos y partículas afines menos el número total de sus antipartículas). Cuando hacemos la lista de todos los términos posibles en las ecuaciones de campo que serían compatibles con las simetrías fundamentales del modelo estándar y la condición de renormalizabilidad, encontramos que no hay ningún término en las ecuaciones de campo que pudiera violar estas leyes de conservación. Es la conservación del número de quarks y de leptones la que impide procesos como la desintegración de los tres quarks en el interior de un protón en un positrón y un fotón, y por lo tanto es esta ley de conservación la que asegura la estabilidad de la materia ordinaria. Pero ahora sabemos que los complicados términos no renormalizables de las ecuaciones de campo que podrían violar la conservación del número de quarks y leptones están realmente presentes, aunque sean muy pequeños. Estos pequeños términos en las ecuaciones de campo darían lugar a la desintegración del protón (por ejemplo, en un positrón y un fotón o alguna otra partícula neutra), pero con una vida media muy larga,

que originalmente se estimó que estaría por encima de los cien millones de millones de millones de millones de años, o quizá algo más larga o más corta. Este número es tan grande como el número de protones que hay en 100 toneladas de agua, de modo que, si esto fuera cierto, entonces un protón se desintegraría por término medio cada año en 100 toneladas de agua. Se han emprendido experimentos para detectar tal desintegración del protón sin que, durante años, hayan tenido éxito. Pero pronto habrá una instalación en Japón donde 10 000 toneladas de agua serán cuidadosamente observadas en busca de destellos de luz que serían una señal de las desintegraciones protónicas. Quizá este experimento vea algo.

Mientras tanto, ha habido recientemente sugerencias curiosas sobre una posible violación de la conservación del número leptónico. En el modelo estándar esta ley de conservación es responsable de mantener a los neutrinos sin masa, y si esta ley de conservación fuese violada esperaríamos que los neutrinos tuviesen masas pequeñas, alrededor de una cienmilésima de voltio (o en otras palabras, alrededor de una milmillonésima parte de la masa de un electrón). Esta masa es demasiado pequeña para haber sido detectada en cualquier experimento de laboratorio hecho hasta ahora, pero podría tener un efecto sutil, el de permitir a los neutrinos que nacen como neutrinos de tipo electrónico (es decir, miembros de la misma familia del electrón) transformarse lentamente en neutrinos de otros tipos. Esto podría explicar un enigma que ha existido durante bastante tiempo, el que se detecten

muchos menos neutrinos procedentes del Sol de los esperados<sup>126</sup>. Los neutrinos producidos en el núcleo solar son principalmente del tipo electrónico, y los detectores utilizados para observarlos en la Tierra son básicamente sensibles a los neutrinos de tipo electrónico, de modo que quizá los neutrinos de tipo electrónico parezcan estar ausentes debido a que, cuando atraviesan el Sol, se transforman en neutrinos de otro tipo<sup>127</sup>. Experimentos para verificar esta idea con detectores de neutrinos de varios tipos están ahora en curso en Dakota del Sur, Japón, el Cáucaso, Italia y Canadá.

Si tenemos suerte, podremos descubrir aún evidencias definitivas de la desintegración del protón o de la masa del neutrino. O quizá los aceleradores existentes, como el Colisionador protón-antiprotón del Fermilab o el Colisionador electrón-positrón del CERN, puedan proporcionar aún evidencia de la supersimetría. Pero todo esto se está moviendo con una lentitud glacial. La charla de resumen en cualquier conferencia de física de altas energías mantenida en la última década podría (y normalmente lo hace) dar la misma lista de posibles avances espectaculares. Esto es completamente diferente de lo que sucedía en las épocas realmente excitantes del pasado, cuando parecía que cada mes los estudiantes graduados estuvieran corriendo por los pasillos de los departamentos de física de la universidad para divulgar las noticias de un nuevo descubrimiento. Es un tributo a la importancia fundamental de la física de

---

<sup>126</sup> Esto fue observado por primera vez en 1968, en la comparación de los resultados experimentales de Ray Davis, Jr., con el cálculo del flujo esperado de neutrinos que hizo John Bahcall.

<sup>127</sup> Esto fue sugerido en 1985 por S. P. Mikhaev y A. Yu. Smimov, basado en un trabajo anterior de Lincoln Wolfenstein.

partículas elementales el que muchos estudiantes brillantes continúen entrando en el campo cuando se está avanzando tan poco.

Podríamos tener confianza en la salida de este punto muerto si el Supercolisionador Superconductor fuese terminado. Se diseñó para disponer de energía e intensidad suficientes para dilucidar la cuestión del mecanismo de la ruptura de simetría electrodébil, bien mediante el hallazgo de una o más partículas de Higgs o bien revelando signos de nuevas fuerzas fuertes. Si la respuesta al problema de la jerarquía está en la supersimetría, entonces esto también sería descubierto en el Supercolisionador. Por el contrario, si se descubrieran nuevas fuerzas fuertes, entonces el Colisionador encontraría una rica variedad de partículas nuevas con masas de aproximadamente un billón de voltios, que tendrían que ser exploradas antes de que pudiéramos conjeturar qué es lo que va a pasar a las energías mucho más altas en que todas las fuerzas, incluyendo la gravitación, se unifican. En cualquier caso, la física de partículas estaría de nuevo en movimiento. La campaña de los físicos de partículas a favor del Supercolisionador ha sido espoleada por una sensación de desesperación, la sensación de que sólo con los datos de dicho acelerador podremos estar seguros de que nuestro trabajo seguirá adelante.

## Capítulo 8

### La forma de una teoría final

*Si puedes ver en las semillas del tiempo, y decir qué grano germinará y cuál no, entonces háblame<sup>128</sup>.*

*WILLIAM SHAKESPEARE, Macbeth*

Pudiera ser que haya que esperar varios siglos a la teoría final y pudiera ser que resulte totalmente diferente de cualquier cosa que podamos imaginar ahora. Pero supongamos por un momento que esté a la vuelta de la esquina. ¿Qué podemos conjeturar acerca de esta teoría sobre la base de lo que ya conocemos?

La única parte de la física actual que creo probable que sobreviva sin cambios en una teoría final es la mecánica cuántica. Esto no se debe solamente a que la mecánica cuántica es la base de todo nuestro conocimiento actual de la materia y la fuerza, y ha superado pruebas experimentales extraordinariamente rigurosas; más importante es el hecho de que nadie ha sido capaz de imaginar cualquier cambio en la mecánica cuántica de forma que preserve sus éxitos sin llevar a absurdos lógicos.

Aunque la mecánica cuántica proporciona el escenario en el que ocurren todos los fenómenos naturales, por sí misma es un escenario vacío. La mecánica cuántica nos permite imaginar una

---

<sup>128</sup> [If you can look into the seeds of time, / And say which grain will grow and which will not, / Speak then to me].

enorme variedad de diferentes sistemas físicos posibles: sistemas compuestos de cualquier tipo de partículas interaccionando a través de cualquier tipo de fuerzas, o incluso sistemas que ni siquiera están compuestos de partículas. La historia de la física en este siglo ha estado marcada por el crecimiento paulatino de la comprensión de que son los principios de simetría los que dictan los *dramatis personae* del drama que observamos en el escenario cuántico. Nuestro actual modelo estándar de las fuerzas débil, electromagnética y fuerte está basado en simetrías: las simetrías espacio-temporales de la relatividad especial, que exigen que el modelo estándar sea formulado como una teoría de campos, y las simetrías internas, que dictan la existencia del campo electromagnético y los otros campos portadores de las fuerzas del modelo estándar. La gravitación, asimismo, puede ser entendida sobre la base de un principio de simetría, la simetría de la teoría de la relatividad general de Einstein que decreta que las leyes de la naturaleza deben permanecer iguales bajo cualquier cambio posible en la forma de describir las posiciones en el espacio y en el tiempo. Con este siglo de experiencia, se supone generalmente que una teoría final reposará sobre principios de simetría. Esperamos que estas simetrías unificarán la gravitación con las fuerzas débil, electromagnética y fuerte del modelo estándar. Pero durante décadas no supimos lo que eran estas simetrías, y no tuvimos ninguna teoría cuántica matemáticamente satisfactoria de la gravitación que incorporase la simetría subyacente en la relatividad general.



Esto puede haber cambiado ahora. La pasada década ha visto el desarrollo de un marco radicalmente nuevo para una teoría cuántica de la gravitación y posiblemente de cualquier otra cosa: la teoría de cuerdas. La teoría de cuerdas ha proporcionado nuestro primer candidato plausible para una teoría final.

Las raíces de esta teoría se remontan a 1968, cuando los teóricos de partículas elementales estaban tratando de entender las fuerzas nucleares fuertes sin recurrir a la teoría cuántica de campos, que en aquella época estaba en un punto bajo de popularidad. Un joven teórico del CERN, Gabriel Veneziano, tuvo la idea de conjeturar simplemente una fórmula que daría las probabilidades para la dispersión de dos partículas a diferentes energías y ángulos, y que tendría algunas propiedades generales exigidas por los principios de la relatividad y de la mecánica cuántica. Utilizando herramientas matemáticas familiares, que cualquier estudiante de física aprende a una u otra edad, fue capaz de construir una fórmula sorprendentemente simple que satisfacía todas estas condiciones. La fórmula de Veneziano atrajo gran atención; pronto fue generalizada por varios teóricos a otros procesos y constituyó la base de un esquema de aproximación sistemático. Nadie entonces tenía ninguna idea de cualquier posible aplicación a la teoría cuántica de la gravitación; este trabajo estaba motivado enteramente por la esperanza de entender las fuerzas nucleares fuertes. (La verdadera teoría de las fuerzas fuertes, la teoría cuántica de campos conocida como cromodinámica cuántica, estaba entonces a varios años en el futuro).

En el curso de este trabajo, los físicos<sup>129</sup> se dieron cuenta de que la fórmula de Veneziano y sus extensiones y generalizaciones no eran simplemente conjeturas felices, sino la teoría de un nuevo tipo de entidad física, una *cuerda* mecanocuántica relativista. Por supuesto, las cuerdas ordinarias están compuestas de partículas como protones, neutrones y electrones, pero estas nuevas cuerdas son diferentes; *ellas* son las cosas de las que los protones y los neutrones se suponen que están compuestos. No es que alguien tuviera súbitamente una inspiración de que la materia está compuesta de cuerdas y luego continuase desarrollando una teoría basada en esta idea; la teoría de cuerdas fue descubierta antes de que cualquiera se diese cuenta de que *era* una teoría de cuerdas.

Estas cuerdas pueden visualizarse como diminutas rasgaduras unidimensionales en el tejido continuo del espacio. Las cuerdas pueden ser abiertas, con dos extremos libres, o cerradas, como una goma elástica. Cuando se desplazan en el espacio, las cuerdas vibran. Cada cuerda puede ser encontrada en cualquier estado entre un número infinito de estados posibles (o *modos*) de vibración, de forma muy similar a los varios tonos producidos por un diapasón vibrante o una cuerda de violín. Las vibraciones de las cuerdas de violín ordinarias se amortiguan con el tiempo porque la energía de vibración de una cuerda de violín tiende a convertirse en un movimiento aleatorio de los átomos de los que la cuerda de violín está compuesta, un movimiento que observamos como calor. Por el contrario, las cuerdas que nos interesan aquí son verdaderamente

---

<sup>129</sup> De manera independiente por Yoichiro Nambu, Holger Nielsen y Leonard Susskind.

fundamentales y mantienen su vibración eternamente; no están compuestas de átomos o de cualquier otra cosa, y no hay lugar al que su energía de vibración pueda escapar<sup>130</sup>.

Se supone que las cuerdas son muy pequeñas, de modo que, cuando se observa una cuerda sin sondearla a muy corta distancia, aparece como una partícula puntual. Puesto que la cuerda puede estar en cualquiera de entre un infinito número de posibles modos de vibración, aparece como una partícula que puede pertenecer a cualquiera de entre un número infinito de tipos posibles, los tipos correspondientes al modo en que la cuerda está vibrando.

Las primitivas versiones de la teoría de cuerdas no estaban libres de problemas<sup>131</sup>. Los cálculos mostraban que entre el infinito número de modos de vibración de una cuerda cerrada existía un modo en el que la cuerda aparecería como una partícula con masa nula y un espín doble que el del fotón<sup>132</sup>. Recordemos que el descubrimiento de las teorías de cuerdas derivó de los esfuerzos de Veneziano para comprender las fuerzas nucleares fuertes, y estas teorías de cuerdas se concibieron originalmente como teorías de las fuerzas fuertes y de las partículas sobre las que actúan. No se conoce ninguna partícula que sienta los efectos de las fuerzas nucleares fuertes que tenga esta masa y este espín, y esperamos que, si existiese una partícula semejante, habría sido descubierta hace tiempo, de modo

---

<sup>130</sup> Este comentario se debe a Edward Witten.

<sup>131</sup> Algunas de estas dificultades podrían evitarse sólo mediante la imposición de la simetría que posteriormente fue denominada supersimetría, de modo que a menudo se las denomina teorías de *supercuerdas*.

<sup>132</sup> Aunque esta partícula no buscada aparecía en las teorías de cuerdas como un modo de vibración de una cuerda *cerrada*, no habría sido posible evitar la aparición de esta partícula considerando sólo cuerdas abiertas, porque al colisionar las cuerdas abiertas inevitablemente se unen para formar cuerdas cerradas.

que habría un serio conflicto con el experimento.

Pero sí que existe una partícula con masa nula y un espín doble que el del fotón. No es una partícula que sienta las fuerzas nucleares fuertes; es el gravitón, la partícula de la radiación gravitatoria. Además, se conocía desde los años sesenta que cualquier teoría de una partícula con este espín y esta masa tendría que parecerse mucho a la relatividad general<sup>133</sup>. La partícula sin masa que había sido encontrada teóricamente en los primeros días de la teoría de cuerdas difería del verdadero gravitón solamente en un aspecto importante: el intercambio de esta nueva partícula sin masa produciría fuerzas que son semejantes a las fuerzas gravitatorias aunque cien billones de billones de billones de veces más fuertes.

Como a menudo sucede en física, los teóricos de las cuerdas habían dado con la solución correcta al problema equivocado. Poco a poco fue ganando base, a principios de los años ochenta, la idea de que la nueva partícula sin masa que había sido descubierta como una consecuencia matemática de las teorías de cuerdas no era ningún tipo de partícula similar al gravitón y que interaccionase fuertemente; realmente era el verdadero gravitón<sup>134</sup>. Para dar a las fuerzas gravitatorias la intensidad correcta, era necesario incrementar la tensión de las cuerdas en las ecuaciones básicas de la teoría de cuerdas en un grado tal que la diferencia de energía entre el estado más bajo y el siguiente estado de una cuerda no fueran los ridículos pocos cientos de millones de voltios

---

<sup>133</sup> Esta conclusión fue alcanzada independientemente por Richard Feynman y por mí mismo.

<sup>134</sup> Esto había sido sugerido por primera vez ya en 1974 por J. Scherk y J. Schwarz e, independientemente, por T. Yoneya.

característicos de los fenómenos nucleares, sino más bien algo del orden de la energía de Planck, la energía de miles de billones de billones de voltios a la que la gravitación se hace tan fuerte como las demás fuerzas<sup>135</sup>. Ésta es una energía tan alta que todas las partículas del modelo estándar, todos los quarks y fotones y gluones y demás, deben ser identificados con los modos más bajos de vibración de la cuerda; de otra forma se necesitaría tanta energía para producirlos que nunca habrían sido descubiertos.

Desde este punto de vista, una teoría cuántica de campos como el modelo estándar es una aproximación a baja energía a una teoría fundamental que no es en absoluto una teoría de campos, sino una teoría de cuerdas. Pensamos ahora que semejantes teorías cuánticas de campos funcionan tan bien como lo hacen a las energías accesibles a los aceleradores modernos no porque la naturaleza se describa finalmente mediante una teoría cuántica de campos, sino porque *cualquier* teoría que satisfaga los requisitos de la mecánica cuántica y la relatividad especial tiene el aspecto de una teoría cuántica de campos a energía suficientemente baja. Cada vez más, consideramos el modelo estándar como una *teoría de campos efectiva*, con el adjetivo «efectiva» recordándonos que tales teorías son sólo aproximaciones a baja energía a una teoría muy diferente, quizá una teoría de cuerdas. El modelo estándar ha estado en el centro de la física moderna, pero este cambio de actitud hacia la teoría cuántica de campos debe marcar el comienzo de una

---

<sup>135</sup> Recuérdese que un voltio, cuando se utiliza como unidad de energía, es la energía adquirida por un electrón al ser impulsado a través de un cable por una batería eléctrica de 1 voltio desde un polo de la batería hasta el otro.

nueva, postmoderna, era en la física.

Puesto que las teorías de cuerdas incorporan gravitones y un montón de otras partículas, proporcionan por primera vez la base para una posible teoría final. En realidad, puesto que un gravitón parece ser una característica inevitable de cualquier teoría de cuerdas, uno puede decir que la teoría de cuerdas explica por qué existe la gravitación. Edward Witten, que más adelante llegó a ser un experto en la teoría de cuerdas, había aprendido este aspecto de las teorías de cuerdas en 1982 en un artículo de revisión escrito por el teórico de CalTech John Schwarz y denominó a esta intuición «la mayor emoción intelectual de mi vida<sup>lxxxiii</sup>».

Las teorías de cuerdas también parecen haber resuelto el problema de los infinitos que habían plagado todas las primitivas teorías cuánticas de la gravitación. Aunque una cuerda pueda tener el aspecto de una partícula puntual, lo más importante acerca de ellas es que *no* son puntos sino objetos extensos. Los infinitos en una teoría cuántica de campos ordinaria tienen su origen en el hecho de que los campos describen partículas puntuales. (Por ejemplo, la ley del inverso del cuadrado da una fuerza infinita cuando colocamos dos electrones puntuales en la misma posición). Por el contrario, las teorías de cuerdas correctamente formuladas parecen estar libres de cualquier infinito<sup>136</sup>.

---

<sup>136</sup> Es cierto que una teoría de cuerdas puede ser considerada simplemente como una teoría de partículas correspondientes a los diferentes modos de vibración de la cuerda, pero, debido al infinito número de especies de partículas en cualquier teoría de cuerdas, las teorías de cuerdas funcionan de forma diferente a las teorías cuánticas de campos ordinarias. Por ejemplo, en una teoría cuántica de campos la emisión y reabsorción de una especie simple de partícula (tal como un fotón) produce un desplazamiento de energía infinito; en una teoría de cuerdas

El interés por las teorías de cuerdas realmente empezó a despegar en 1984, cuando Schwarz, junto con Michael Green del Queen Mary College de Londres, demostró que dos específicas teorías de cuerdas superaban un test de consistencia matemática que no habían pasado las teorías de cuerdas estudiadas previamente<sup>137</sup>. La característica más excitante del trabajo de Green y Schwarz era su sugerencia de que las teorías de cuerdas tenían el tipo de rigidez que buscamos en una teoría realmente fundamental; aunque uno puede concebir un gran número de teorías diferentes de cuerdas abiertas, parece que sólo dos de ellas tienen sentido matemático. El entusiasmo por las teorías de cuerdas alcanzó un tono febril cuando un equipo de teóricos<sup>138</sup> demostró que el límite de baja energía de estas dos teorías de Green-Schwarz tenía un notable parecido con nuestro actual modelo estándar de las fuerzas fuerte, débil y electromagnética, y otro equipo (el «cuarteto de cuerda de Princeton<sup>139</sup>») encontró algunas teorías de cuerdas más que ajustaban aún mucho más estrechamente con el modelo estándar. Muchos teóricos comenzaron a sospechar que tenían a mano una teoría final.

Desde entonces el entusiasmo se ha enfriado algo. Ahora se entiende que existen miles de teorías de cuerdas que son matemáticamente consistentes en el mismo sentido que las dos teorías de Green-Schwarz. Todas estas teorías satisfacen la misma

---

correctamente formulada este infinito se cancela por los efectos de emisión y absorción de partículas pertenecientes al número infinito de las otras especies presentes en la teoría.

<sup>137</sup> Esta inconsistencia en algunas teorías de cuerdas había sido descubierta un poco antes por Witten y Luis Álvarez-Gaumé.

<sup>138</sup> Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger y Edward Witten.

<sup>139</sup> David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec y Ryan Rohm.

simetría subyacente, conocida como *simetría conforme*, pero esta simetría no está sacada de la observación de la naturaleza, como es el caso del principio de relatividad de Einstein; más bien, la simetría conforme parece ser necesaria para garantizar la consistencia mecanocuántica de las teorías<sup>140</sup>. Desde este punto de vista, los millares de teorías de cuerdas individuales representan meramente diferentes maneras de satisfacer las demandas de la simetría conforme. Se cree, en general, que estas diferentes teorías de cuerdas no son teorías realmente diferentes, sino que más bien representan diferentes modos de resolver la misma teoría subyacente. Pero no estamos seguros de esto y nadie sabe cuál pueda ser dicha teoría subyacente.

Cada una de las miles de teorías de cuerdas individuales tiene sus propias simetrías espacio-temporales. Algunas satisfacen el principio de la relatividad de Einstein; otras no tienen siquiera algo que pudiéramos reconocer como un espacio tridimensional ordinario. Cada teoría de cuerdas tiene también sus propias simetrías internas del mismo tipo general que las simetrías internas

---

<sup>140</sup> La simetría conforme se basa en el hecho de que a medida que un conjunto de cuerdas se mueve a través del espacio, barre una superficie bidimensional en el espacio-tiempo: cada punto de la superficie tiene una etiqueta como coordenada que da el tiempo y otra etiqueta que especifica la localización a lo largo de una de las cuerdas. Igual que para cualquier otra superficie, la geometría de esta superficie bidimensional barrida por las cuerdas se describe especificando las distancias entre cualquier par de puntos muy próximos en términos de sus etiquetas coordenadas. El principio de invariancia conforme afirma que las ecuaciones que gobiernan la cuerda conservan su forma si cambiamos el modo de medir las distancias multiplicando todas las distancias entre un punto y cualquier punto adyacente por una cantidad que puede depender de una manera arbitraria de la posición del primer punto. La simetría conforme es necesaria porque, de otro modo, las vibraciones de la cuerda en la dirección temporal conducirían (según las formulaciones particulares de la teoría) bien a probabilidades negativas o bien a una inestabilidad del vacío. Con la simetría conforme estas vibraciones de tipo temporal pueden ser eliminadas de la teoría mediante una transformación de simetría, y así resultan inocuas.



que subyacen en nuestro actual modelo estándar de las fuerzas débil, electromagnética y fuerte. Pero una diferencia importante entre las teorías de cuerdas y todas las teorías anteriores es que las simetrías espacio-temporales y las simetrías internas no están introducidas a la fuerza; son consecuencias matemáticas de la forma particular en que las reglas de la mecánica cuántica (y la simetría conforme consiguientemente requerida) son satisfechas en cada teoría de cuerdas particular. Por consiguiente, las teorías de cuerdas representan potencialmente un paso importante hacia una explicación racional de la naturaleza. Podrían ser también las teorías más ricas y matemáticamente consistentes compatibles con los principios de la mecánica cuántica y, en particular, las únicas entre tales teorías que incorporan algo como la gravitación.

Una buena parte de los jóvenes físicos teóricos de hoy día están trabajando en teorías de cuerdas. Han surgido algunos resultados alentadores. Por ejemplo, es natural en las teorías de cuerdas que las intensidades intrínsecas de las fuerzas fuerte y electrodébil se hagan iguales a una energía muy alta, relacionada con la tensión de la cuerda, incluso aunque no exista una simetría independiente que unifique estas fuerzas. Pero hasta el momento no ha surgido ninguna predicción cuantitativa detallada que nos permita una prueba decisiva de la teoría de cuerdas.

Este punto muerto ha llevado a una desgraciada escisión en la comunidad de los físicos. La teoría de cuerdas es muy exigente; pocos de los teóricos que trabajan en otros problemas tienen los fundamentos para comprender los artículos técnicos sobre la teoría

de cuerdas, y pocos de los teóricos de cuerdas tienen tiempo para dedicarse a algo más en física, y mucho menos a experimentos de alta energía. Algunos de mis colegas han reaccionado ante esta desafortunada dificultad con cierta hostilidad hacia la teoría de cuerdas. Yo no comparto este sentimiento. La teoría de cuerdas proporciona nuestra única fuente actual de candidatos para una teoría final; ¿cómo podría nadie esperar que muchos de los teóricos jóvenes más brillantes *no* trabajasen en ella?

Es una lástima que hasta ahora no haya tenido más éxitos, pero los teóricos de cuerdas, como otros, están tratando de hacerlo lo mejor que pueden en un momento muy difícil de la historia de la física. Simplemente tenemos que esperar o bien a que la teoría de cuerdas tenga más éxitos o bien a que nuevos experimentos abran vías de progreso en otras direcciones.

Por desgracia, nadie ha encontrado todavía una teoría de cuerdas específica que haga encajar exactamente las simetrías espacio-temporales, las simetrías internas particulares y la lista de quarks y leptones que vemos en la naturaleza. Además, no sabemos aún cómo enumerar las posibles teorías de cuerdas o evaluar sus propiedades. Para resolver estos problemas, parece necesario inventar nuevos métodos de cálculo que vayan más allá de las técnicas que tan bien han funcionado en el pasado. En electrodinámica cuántica, por ejemplo, podemos calcular el efecto de intercambiar dos fotones entre electrones en un átomo considerándolo como una pequeña corrección al efecto de intercambiar un fotón, y a continuación podemos calcular el efecto

de intercambiar tres fotones como una corrección aún menor, y así sucesivamente, deteniendo la cadena de cálculos donde las correcciones restantes sean demasiado pequeñas para resultar de interés. Este método de cálculo se conoce como teoría de las perturbaciones. Pero el punto crucial de la teoría de cuerdas implica el intercambio de infinito número de cuerdas y, por lo tanto, no puede ser abordado mediante la teoría de las perturbaciones.

Esto no es lo peor. Incluso si supiéramos cómo tratar matemáticamente estas teorías de cuerdas, e incluso si pudiéramos identificar una de ellas que corresponda a lo que vemos en la naturaleza, por el momento no tenemos un criterio que nos permita decir *por qué* esa teoría de cuerdas es la que se aplica al mundo real. Repito una vez más: el propósito de la física en su nivel más fundamental no es solamente describir el mundo, sino explicar por qué es como es.

Al buscar un criterio que nos permita escoger la teoría de cuerdas verdadera podemos vernos obligados a invocar un principio con un estatus dudoso en la física, conocido como el *principio antrópico*, que afirma que las leyes de la naturaleza deberían permitir la existencia de seres inteligentes que puedan preguntar sobre las leyes de la naturaleza<sup>lxxxiv</sup>.

La idea de un principio antrópico comenzó con la observación de que las leyes de la naturaleza parecen sorprendentemente bien ajustadas para la existencia de la vida. Un famoso ejemplo lo proporciona la síntesis de los elementos. Según las ideas modernas, esta síntesis comenzó cuando el universo tenía unos tres minutos

de existencia (antes de eso estaba demasiado caliente para que los protones y los neutrones se uniesen en los núcleos atómicos) y más tarde continuó en las estrellas. Originalmente se había pensado que los elementos se formaban añadiendo partículas nucleares de una en una al núcleo atómico, empezando con el elemento más simple, el hidrógeno, cuyo núcleo consiste en una sola partícula (un protón). Pero, aunque no había problemas para construir un núcleo de helio, que contiene cuatro partículas nucleares (dos protones y dos neutrones), no existen núcleos estables con cinco partículas nucleares y, por consiguiente, no hay forma de dar el siguiente paso. La solución encontrada finalmente por Edwin Salpeter en 1952 es que dos núcleos de helio pueden unirse en las estrellas para formar el núcleo inestable del isótopo de berilio-8 que, en ocasiones y antes de que tenga oportunidad de fisionarse en dos núcleos de helio, absorbe otro núcleo más de helio y forma un núcleo de carbono<sup>141</sup>. Sin embargo, como fue señalado en 1954 por Fred Hoyle, para que este proceso pueda dar cuenta de las abundancias cósmicas observadas de carbono, debe existir un estado del núcleo de carbono con una energía que da una probabilidad anormalmente grande para que se forme en la colisión de un núcleo de helio y un núcleo de berilio-8. (Precisamente tal estado fue descubierto más adelante por los experimentadores que trabajaban con Hoyle<sup>142</sup>). Una vez que el carbono se ha formado en las estrellas, no hay ningún obstáculo para construir los elementos

---

<sup>141</sup> Salpeter, en su artículo de 1952, también atribuye a E. J. Öpik el haber tenido la misma idea en 1951.

<sup>142</sup> D. N. F. Dunbar, W. A. Wensel y W. Whaling.

más pesados, incluyendo aquéllos como el oxígeno y el nitrógeno que son necesarios para las formas de vida conocidas<sup>143</sup>. Pero, para que esto funcione, la energía de este estado del núcleo de carbono debe estar muy próxima a la energía de un núcleo de berilio-8 más la energía de un núcleo de helio. Si la energía de este estado de un núcleo de carbono fuera demasiado grande o demasiado pequeña, entonces poco carbono o elementos más pesados se formarían en las estrellas, y solamente con hidrógeno y helio no habría forma de que pudiera aparecer la vida. Las energías de los estados nucleares dependen de una manera complicada de todas las constantes de la física, tales como las masas y las cargas eléctricas de todos los diferentes tipos de partículas elementales. A primera vista parece destacable que estas constantes tomen precisamente los valores necesarios para hacer posible que el carbono se forme de esta manera.

La evidencia de que las leyes de la naturaleza han sido precisamente ajustadas para hacer posible la vida no me parece muy convincente. Por una parte, un grupo de físicos<sup>144</sup> ha demostrado recientemente que la energía del estado del carbono en cuestión podría ser incrementada apreciablemente sin una reducción significativa de la cantidad de carbono producida en las estrellas<sup>145</sup>. Asimismo, si cambiamos las constantes de la naturaleza

---

<sup>143</sup> De hecho, los niveles de energía del oxígeno deben también tener ciertas propiedades especiales para evitar que todo el carbón se transforme en oxígeno.

<sup>144</sup> M. Livio, D. Hollowell, A. Weiss y J. W. Truran.

<sup>145</sup> Concretamente, alrededor de 60 000 voltios. Se reconoce que ésta es una energía muy pequeña comparada con la diferencia de 7 644 000 voltios entre la energía de este estado inestable y la energía del estado estable más bajo del carbono. Pero no se necesita ningún ajuste fino para hacer que la energía de este estado inestable del núcleo de carbono sea la

podríamos encontrar muchos otros estados de los núcleos de carbono y de otros núcleos que podrían proporcionar vías alternativas para la síntesis de elementos más pesados que el helio. No tenemos ninguna buena manera de estimar cuán improbable es que las constantes de la naturaleza tomaran valores que son favorables para la vida inteligente.

Sea o no el principio antrópico necesario para explicar algo parecido a las energías de los estados nucleares, hay un contexto en el que sería simple sentido común<sup>146</sup>. Quizá todos los diferentes universos lógicamente aceptables existan en algún sentido, cada uno de ellos con su propio conjunto de leyes fundamentales. Si esto es cierto, entonces existen ciertamente muchos universos cuyas leyes o historia podrían hacerlos inhóspitos para la vida inteligente. Pero cualquier científico que pregunte por qué el mundo es como es debe estar viviendo en uno de los otros universos, en los que la vida inteligente *pudo* aparecer<sup>147</sup>.

El punto débil de esta interpretación del principio antrópico es que no está claro en absoluto cuál pueda ser el significado de una multiplicidad de universos. Una posibilidad muy simple propuesta por Hoyle es que las constantes de la naturaleza varían de una

---

misma, dentro de este margen de error, que la energía de un núcleo de berilio-8 y un núcleo de helio, porque con una buena aproximación los estados relevantes de los núcleos de carbono y berilio son precisamente moléculas nucleares débilmente ligadas que constan de tres o dos núcleos de helio. (Agradezco este comentario a mi colega Vadim Kaplunovsky de la Universidad de Texas).

<sup>146</sup> Esta versión del principio antrópico se conoce a veces como principio antrópico débil.

<sup>147</sup> Un físico soviético emigrado me contó que hace algunos años circulaba un chiste por Moscú acerca de que el principio antrópico explica por qué la vida es tan miserable. Existen muchos más modos de que la vida sea miserable que de que sea feliz; el principio antrópico sólo requiere que las leyes de la naturaleza permitan la existencia de seres inteligentes, y no que estos seres disfruten.

región a otra, de modo que cada región del universo es una especie de subuniverso<sup>lxxxv</sup>. El mismo tipo de interpretación de los universos múltiples sería posible si lo que normalmente llamamos «constantes» de la naturaleza fueran diferentes en diferentes épocas de la historia del universo. Más recientemente ha habido mucha discusión sobre una posibilidad más revolucionaria, la de que nuestro universo y los demás universos lógicamente posibles y con otras leyes finales sean de alguna manera burbujas de un grandioso megauniverso. Por ejemplo, en recientes intentos de aplicar la mecánica cuántica a la gravitación se observa que, aunque el espacio vacío ordinario parece tranquilo y sin ningún rasgo sobresaliente, como la superficie del mar vista desde grandes alturas, cuando se le mira desde muy cerca el espacio hierve con fluctuaciones cuánticas, hasta el punto de que pueden abrirse «agujeros de gusano» que conectan partes del universo con otras partes que están muy distantes en el espacio y en el tiempo<sup>148</sup>. En 1987 (siguiendo el trabajo previo de Stephen Hawking, James Hartle y otros), Sidney Coleman, en Harvard, demostró que el efecto de la apertura o cierre de un agujero de gusano es precisamente el de cambiar las diversas constantes que aparecen en las ecuaciones que gobiernan diversos campos. Al igual que en la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica, la función de onda del universo se divide en un gran número de términos, en cada uno de los cuales las «constantes» de la naturaleza toman valores

---

<sup>148</sup> Estrictamente hablando, estos agujeros de gusano aparecen matemáticamente en una aproximación a la gravedad cuántica conocida como integración de camino euclidiana. No está claro qué tienen que ver con los procesos físicos reales.

diferentes, con varias probabilidades diferentes<sup>149</sup>. En cualquier teoría de este tipo, resulta de simple sentido común el que nos encontremos en una región del espacio o en una época de la historia cósmica o en un término de la función de onda en el que las «constantes» de la naturaleza resulten tener valores favorables a la existencia de vida inteligente.

Ciertamente los físicos seguirán tratando de explicar las constantes de la naturaleza sin recurrir a argumentos antrópicos. Mi hipótesis preferida es que nos encaminamos a descubrir que, de hecho, todas las constantes de la naturaleza (con una posible excepción) están determinadas por principios de simetría de una u otra clase, y que la existencia de alguna forma de vida no requiere ningún ajuste fino muy impresionante de las leyes de la naturaleza. La única constante de la naturaleza que quizá tenga que ser explicada por algún tipo de principio antrópico es la conocida como *constante cosmológica*.

La constante cosmológica apareció originalmente en la teoría física en el primer intento de Einstein de aplicar su nueva teoría de la relatividad general al universo entero. En este trabajo supuso, como era usual en aquella época, que el universo es estático, pero pronto descubrió que, cuando se aplicaban al universo entero, las ecuaciones de su campo gravitatorio en su forma original no tenían ninguna solución estática. (Realmente esta conclusión no es

---

<sup>149</sup> Coleman continúa argumentando también (como Baum y Hawking hicieron antes) que las probabilidades para estas constantes tienen picos infinitamente abruptos en ciertos valores especiales, de modo que es abrumadoramente probable que las constantes tomen estos valores especiales. Pero esta conclusión se basa en una formulación matemática (la de integración de camino euclidiana) de la cosmología cuántica cuya consistencia ha sido cuestionada. Es difícil estar seguros sobre tales cuestiones puesto que estamos trabajando con la gravitación en un contexto cuántico donde nuestras teorías actuales dejan de ser adecuadas.



específica de la relatividad general; también en la teoría de la gravitación de Newton podríamos encontrar soluciones con galaxias que se acercan unas hacia otras bajo la influencia de su gravitación mutua, y otras soluciones con galaxias que se alejan unas de otras como consecuencia de una explosión inicial, pero no podríamos esperar que las galaxias estuvieran manteniéndose más o menos en reposo en el espacio). Para permitir un universo estático, Einstein decidió cambiar su teoría. Introdujo un término en sus ecuaciones que produciría algo parecido a una fuerza repulsiva a grandes distancias y que, por lo tanto, compensaría la fuerza atractiva de la gravitación. Este término incluye una constante libre, que determinaría el tamaño del universo en la cosmología estática de Einstein y que, por ello, llegó a ser conocida como constante cosmológica.

Esto sucedía en 1917. Debido a la guerra, Einstein no sabía que un astrónomo norteamericano, Vesto Slipher, había encontrado ya indicios de que las galaxias (como ahora las llamamos) se están alejando unas de otras, de modo que de hecho el universo no es estático, sino que está en expansión. La expansión fue confirmada y su ritmo medido después de la guerra por Edwin Hubble, utilizando el nuevo telescopio de 100 pulgadas del monte Wilson. Einstein llegó a lamentar el haber deformado sus ecuaciones con la introducción de la constante cosmológica<sup>150</sup>. Sin embargo, la

---

<sup>150</sup> Para demostrar una vez más lo complicada que puede ser la historia de la ciencia mencionaré que, inmediatamente después del trabajo de Einstein en 1917 sobre cosmología, su amigo Wilhelm de Sitter señaló que, cuando se modificaban las ecuaciones del campo gravitatorio de Einstein mediante la inclusión de una constante cosmológica, aparece un tipo diferente de soluciones, también aparentemente estáticas, pero que no contienen materia (o con

posibilidad de una constante cosmológica no iba a desaparecer tan fácilmente.

Por una parte, no hay razón para *no* incluir una constante cosmológica en las ecuaciones de campo de Einstein. La teoría de Einstein se había basado en un principio de simetría que afirma que las leyes de la naturaleza no deberían depender del sistema de referencia espaciotemporal que utilizamos para estudiar dichas leyes. Pero su teoría original no era la teoría más general permitida por este sencillo principio de simetría. Existe un gran número de términos posibles permitidos que podrían añadirse a las ecuaciones de campo, cuyos efectos serían despreciables a distancias astronómicas y pueden así ser ignorados sin problemas. Aparte de éstos, existe solamente un término que podría añadirse a las ecuaciones de campo de Einstein sin violar el principio de simetría fundamental de la relatividad general y que sería importante en astronomía: éste es el término que incluye la constante cosmológica. Einstein actuaba en 1915 bajo la hipótesis de que las ecuaciones de campo deberían ser escogidas de la forma más sencilla posible. La experiencia de los tres últimos cuartos de siglo nos ha enseñado a desconfiar de semejantes hipótesis; generalmente encontramos que

---

un contenido de materia despreciable). Esto era desagradable para Einstein porque en su solución la constante cosmológica está relacionada con la densidad de materia cósmica promedio, de acuerdo con lo que Einstein tomó de las enseñanzas de Mach. Además, la solución de Einstein (con materia) es realmente inestable; cualquier pequeña perturbación produciría que finalmente se transformase en la solución de De Sitter. Para complicar las cosas aún más, señalaré que el modelo de De Sitter es sólo aparentemente estático; aunque la geometría del espacio-tiempo en el sistema de coordenadas utilizado por él no cambia con el tiempo, cualquier pequeña partícula de prueba colocada en tu universo se alejaría de cualquier otra. De hecho, cuando las medidas de Slipher fueron conocidas en Inglaterra a principios de los años veinte, fueron interpretadas inicialmente por Arthur Eddington a partir de la solución de De Sitter a las ecuaciones de Einstein *con* una constante cosmológica, que tiene también una solución estática, y no a partir de la teoría original de Einstein, que no la tiene.

cualquier complicación en nuestras teorías que no esté prohibida por alguna simetría u otro principio fundamental ocurre en la práctica. Por lo tanto, no es suficiente decir que una constante cosmológica es una complicación innecesaria. La simplicidad, como cualquier cosa, debe ser explicada.

En mecánica cuántica el problema es peor. Los diversos campos que pueblan nuestro universo están sujetos a continuas fluctuaciones cuánticas que dan una energía incluso al espacio nominalmente vacío. Esta energía es observable solamente a través de sus efectos gravitatorios; cualquier clase de energía genera campos gravitatorios y, a su vez, es afectada por los campos gravitatorios, de modo que una energía que llene todo el espacio podría tener efectos importantes en la expansión del universo. Realmente no podemos calcular la energía por unidad de volumen que es producida por estas fluctuaciones cuánticas; utilizando las aproximaciones más simples resulta ser infinita. Pero con una hipótesis razonable sobre cómo desechar las fluctuaciones de alta frecuencia que son responsables de los infinitos, la energía del vacío por unidad de volumen viene a ser enormemente grande: alrededor de un billón de billones de billones de billones de billones de billones de billones de billones de veces mayor que la que está permitida por el ritmo de expansión observado del universo. Éste debe ser el peor fracaso en una estimación del orden de magnitud de la historia de la ciencia.

Si esta energía del espacio vacío es positiva, entonces da lugar a una repulsión gravitatoria entre partículas de materia a distancias

muy grandes, precisamente como el término que incluye la constante cosmológica que Einstein añadió a sus ecuaciones de campo en 1917. Podemos así considerar la energía debida a las fluctuaciones cuánticas simplemente como una contribución a la constante cosmológica «total»; la expansión del universo está afectada solamente por esta constante cosmológica total, no por la constante cosmológica en las ecuaciones de campo de la relatividad general o por la energía del vacío cuántico por separado. Esto abre la posibilidad de que el problema de la constante cosmológica y el problema de la energía del espacio vacío puedan cancelarse. En otras palabras, puede haber una constante cosmológica *negativa* en las ecuaciones de campo de Einstein que simplemente cancele el efecto de la enorme energía del vacío debida a las fluctuaciones cuánticas. Pero, para que todo esto sea consistente con lo que sabemos sobre la expansión del universo, la constante cosmológica total debe ser tan pequeña que estos dos términos en la constante cosmológica total tendrían que cancelarse hasta la 120 cifra decimal. No nos sentiríamos muy felices si una cosa de este tipo quedara sin explicar.

Los físicos teóricos han estado durante años tratando de comprender la cancelación de la constante cosmológica total, sin haber encontrado hasta el momento ninguna explicación convincente<sup>lxxxvi</sup>. La teoría de cuerdas no hace otra cosa que empeorar el problema. Cada una de las muy diferentes teorías de cuerdas da un valor diferente para la constante cosmológica total (incluyendo los efectos de las fluctuaciones del vacío cuántico), pero

en el caso general este valor viene a ser demasiado grande<sup>151</sup>. Con una constante cosmológica total tan grande, el espacio estaría tan fuertemente curvado que no mantendría ninguna semejanza con el espacio tridimensional familiar de la geometría euclidiana en el que vivimos.

Si todo lo demás falla, quizá tengamos que volver a una explicación antrópica. Quizá existan en un sentido u otro muchos «universos» diferentes, cada uno de ellos con su propio valor para la constante cosmológica. Si esto fuera cierto, entonces el único universo en el que podríamos esperar encontrarnos es uno en el que la constante cosmológica total sea suficientemente pequeña para permitir que la vida aparezca y evolucione. Para concretar, si la constante cosmológica total fuese grande y negativa, el universo recorrería su ciclo vital de expansión y contracción demasiado rápidamente para que la vida tuviera tiempo de aparecer. Por el contrario, si la constante cosmológica total fuese grande y positiva, el universo se expandiría para siempre, pero la fuerza repulsiva producida por la constante cosmológica impediría el agrupamiento gravitatorio de la materia para formar galaxias y estrellas en el universo primitivo y, por consiguiente, no dejaría lugar para la aparición de la vida. Quizá la verdadera teoría de cuerdas sea una (si es que sólo hay una) que conduzca a una constante cosmológica total en el intervalo relativamente estrecho de valores pequeños que permitieran la

---

<sup>151</sup> No podemos siquiera esperar que se encuentre algún mecanismo mediante el cual el estado vacío pueda perder su energía decayendo a un estado de energía menor y por consiguiente a una constante cosmológica total menor, hasta transformarse finalmente en un estado con constante cosmológica total nula, porque algunos de estos posibles estados vacíos en las teorías de cuerdas ya tienen una constante cosmológica total con un gran valor *negativo*.

aparición de la vida.

Una de las consecuencias más interesantes de esta línea de pensamiento es que no existe razón por la que la constante cosmológica total (incluyendo los efectos de las fluctuaciones del vacío cuántico) debiera ser estrictamente nula; el principio antrópico requiere solamente que sea lo bastante pequeña para permitir la formación de galaxias y que estas sobrevivan durante miles de millones de años. De hecho, por algún tiempo han existido indicios procedentes de la observación astronómica de que la constante cosmológica total no es nula, sino pequeña y positiva.

Uno de estos indicios lo proporciona el famoso problema de la «masa perdida cosmológica». El valor más natural para la densidad de masa del universo (y el valor exigido por las más conocidas teorías cosmológicas actuales) es el de la densidad cuya atracción gravitatoria apenas permitiría que el universo se mantenga en expansión para siempre<sup>152</sup>. Pero esta densidad es de cinco a diez veces mayor que la que proporciona la masa de los cúmulos de galaxias (como se infiere de los estudios de los movimientos de galaxias en estos cúmulos). La materia perdida podría perfectamente ser materia oscura de algún tipo, pero existe otra posibilidad. Como ya se ha mencionado, el efecto de una constante cosmológica positiva es precisamente el de una densidad de energía uniforme y constante, que según la famosa relación de Einstein entre masa y energía es equivalente a una densidad de masa

---

<sup>152</sup> El descubrimiento de cualquier densidad menor o mayor plantearía la pregunta de por qué la expansión ha continuado durante miles de millones de años y, pese a todo, aún no ha llegado a detenerse.

uniforme y constante. Es así posible que de un 80 a un 90 por 100 de la densidad de masa cósmica que falta sea proporcionado por una constante cosmológica total positiva más que por cualquier tipo de materia real.

Esto no quiere decir que no haya diferencia entre una densidad de materia real y una constante cosmológica total positiva. El universo está expandiéndose, de modo que, cualquiera que sea ahora la densidad de materia real, la densidad fue mucho mayor en el pasado. En contraste, la constante cosmológica total es constante en el tiempo, y por lo tanto también lo es la densidad de materia a la que equivale. Cuanto mayor sea la densidad de materia, más rápida es la expansión del universo, de modo que el ritmo de expansión en el pasado debería haber sido mucho mayor si la masa perdida fuera materia ordinaria que si la expansión fuera efecto de una constante cosmológica.

Otro indicio que apunta más concretamente hacia una constante cosmológica total positiva procede de un ya viejo problema respecto a la edad del universo. En las teorías cosmológicas convencionales podemos utilizar el ritmo de expansión observado del universo para inferir que el universo tiene entre 7000 y 12 000 millones de años. Pero las edades de los cúmulos globulares de estrellas dentro de nuestra propia galaxia se estiman normalmente entre 12 000 y 15 000 millones de años, Nos enfrentamos a la idea de un universo más joven que los cúmulos globulares que contiene. Para evitar esta paradoja tendríamos que aceptar las estimaciones más bajas para las edades de los cúmulos globulares y las estimaciones más altas

para la edad del universo. Por otra parte, como ya hemos visto, la introducción de una constante cosmológica positiva en lugar de materia oscura tendría el efecto de disminuir nuestra estimación del ritmo de expansión del universo en el pasado y, por consiguiente, de incrementar la edad del universo que inferiríamos a partir de cualquier ritmo de expansión actual dado. Por ejemplo, si la constante cosmológica contribuye al 90 por 100 de la densidad de masa cósmica, entonces, incluso para las mayores estimaciones del ritmo actual de expansión, la edad del universo sería 11 000 millones de años en lugar de sólo 7000 millones de años, de modo que cualquier discrepancia sería con las edades de los cúmulos globulares desaparecería.

Una constante cosmológica positiva que proporcione del 80 al 90 por 100 de la densidad de masa cósmica actual está perfectamente dentro de los límites que permitirían la existencia de vida. Sabemos que los cuásares, y presumiblemente también las galaxias, estaban condensándose ya a partir del *big bang* en un momento tan temprano del universo que éste sólo tenía una sexta parte de su tamaño actual, puesto que vemos luz procedente de cuásares cuya longitud de onda se ha multiplicado (es decir, se ha desplazado hacia el rojo) por un factor seis. En ese tiempo la densidad de masa real del universo era de seis al cubo o alrededor de doscientas veces mayor de la que es ahora, así que una constante cosmológica correspondiente a una densidad de masa que es sólo de cinco a diez veces mayor que la densidad de masa *actual* podría no haber tenido ningún efecto significativo en la formación de las galaxias *entonces*,



aunque habría impedido una formación de galaxias más reciente. Una constante cosmológica que proporciona una densidad de masa de cinco a diez veces mayor que la densidad de materia cósmica actual es, por lo tanto, muy aproximadamente lo que esperaríamos sobre bases antrópicas.

Afortunadamente ésta es una cuestión que (a diferencia de muchas de las otras cuestiones discutidas en este capítulo) puede ser establecida en poco tiempo por la observación astronómica. Como hemos visto, el ritmo de expansión del universo en el pasado tendría que haber sido mucho mayor si la masa perdida está constituida por materia ordinaria en lugar de ser debida a una constante cosmológica. Esta diferencia en los ritmos de expansión afecta a la geometría del universo y a las trayectorias de los rayos de luz en formas que podrían ser detectadas por los astrónomos. (Por ejemplo, alteraría el número de galaxias que se observa que se están alejando de nosotros a distintas velocidades; y alteraría también el número de lentes gravitacionales galácticas, galaxias cuyo campo gravitatorio curva la luz de los objetos más distantes lo suficiente como para formar imágenes múltiples). Hasta el momento, las observaciones no son concluyentes, pero estas cuestiones están siendo activamente estudiadas en varios observatorios, y finalmente confirmarán o descartarán una constante cosmológica que proporcione entre un 80 y un 90 por 100 de la densidad de masa actual del universo. Semejante constante cosmológica es tan inferior a la que habríamos esperado a partir de estimaciones de las fluctuaciones cuánticas que sería difícil entender de otra forma que

no fuera sobre bases antrópicas. Por consiguiente, si tal constante cosmológica es confirmada por la observación, será razonable inferir que nuestra propia existencia juega una parte importante en la explicación de por qué el universo es como es.

Por si sirve de algo, espero que éste no sea el caso. Como físico teórico me gustaría vernos capaces de hacer predicciones precisas, no afirmaciones vagas de que ciertas constantes tienen que estar en un intervalo que es más o menos favorable a la vida. Espero que la teoría de cuerdas nos proporcione realmente una base para una teoría final y que esta teoría resulte tener suficiente poder predictivo para que podamos ser capaces de asignar valores a todas las constantes de la naturaleza, incluyendo la constante cosmológica. Veremos.

## Capítulo 9

### Frente a la finalidad

*¡El Polo al fin! El premio a tres siglos... No puedo creer que lo haya conseguido. Parece todo tan simple y tan tópico.*

*Del Diario de ROBERT PEARY, citado por él mismo en *The North Pole**

Es difícil imaginar que podamos estar alguna vez en posesión de principios físicos finales que no tengan explicación en términos de principios más profundos. Mucha gente da por supuesto que en su lugar encontraremos una cadena sin fin de principios cada vez más profundos. Por ejemplo, Karl Popper, el decano de los filósofos de la ciencia modernos, rechaza «la idea de una explicación última<sup>lxxxvii</sup>». Él mantiene que «toda explicación puede ser a su vez explicada a partir de una teoría o conjetura de un grado de universalidad mayor. No puede haber una explicación que no necesite una explicación posterior...».

Popper y muchos otros que creen en una cadena infinita de principios cada vez más fundamentales podrían estar en lo cierto. Pero yo no creo que esta posición pueda ser defendida sobre la base de que nadie ha encontrado todavía una teoría final. Esto sería como si un explorador del siglo XIX razonara que, puesto que todas

las exploraciones árticas en los siglos previos habían encontrado siempre que por muy lejos que fuesen hacia el norte todavía había más océano y hielo por explorar, esto quería decir que o bien no había Polo Norte o que, aunque lo hubiera, nadie lo alcanzaría. Algunas exploraciones sí llegan a un objetivo final.

Parece que existe una impresión muy extendida de que los científicos se han engañado con frecuencia en el pasado con la idea de que habían encontrado una teoría final. Se les imagina como al explorador Frederick Cook en 1908, quien afirmaba, frente a todos los demás, que había alcanzado el Polo Norte. Se supone que los científicos son dados a construir elaborados esquemas teóricos a los que califican de teoría final, y que luego los defienden tercamente hasta que una evidencia experimental aplastante revela a las nuevas generaciones de científicos que todos estos esquemas son falsos. Pero, por lo que yo sé, en nuestro siglo, ningún físico reputado ha afirmado que se hubiera encontrado realmente una teoría final. A veces, los físicos infravaloran la distancia que debe ser aún recorrida antes de que se alcance una teoría final. Recordemos la predicción de Michelson de 1902 de que «llegará el día no muy lejano en que las líneas convergentes de muchas regiones del pensamiento aparentemente remotas se encontrarán en... una base común». Más recientemente, Stephen Hawking, al tomar posesión de la cátedra lucasiana de Matemáticas en Cambridge (la cátedra que ocuparon previamente Newton y Dirac), sugirió en su lección inaugural que las teorías de «supergravedad extendida», entonces de moda, iban a proporcionar una base para

algo parecido a una teoría final. Dudo que Hawking sugiriera esto mismo hoy. Pero ni Michelson ni Hawking afirmaron nunca que una teoría final hubiese sido ya alcanzada.

Si la historia sirve de guía, me parece sugerir que *existe* una teoría final. En este siglo hemos visto una convergencia de las flechas explicativas, como la convergencia de los meridianos hacia el Polo Norte. Nuestros principios más profundos, aunque todavía no finales, se han hecho continuamente más simples y económicos. Vimos esta convergencia al explicar las propiedades de un trozo de tiza, y yo la he observado en el transcurso de mi propia carrera dentro de la física. Cuando yo era un estudiante licenciado tuve que aprender una gran cantidad de información miscelánea sobre las interacciones débil y fuerte entre las partículas elementales. Hoy día, los estudiantes de física de partículas elementales aprenden el modelo estándar y una gran cantidad de matemáticas y, a menudo, poco más. (Los profesores de física a veces se llevan las manos a la cabeza por lo poco que los estudiantes saben sobre los fenómenos reales de la física de partículas elementales, pero supongo que los que me enseñaron en Cornell y Princeton se llevaban las manos a la cabeza por lo poco que yo sabía de espectroscopia atómica). Es muy difícil imaginar una regresión de teorías cada vez más fundamentales que se hacen continuamente más sencillas y más unificadas sin que las flechas explicativas tengan que converger en alguna parte.

Es concebible, aunque poco probable, que las cadenas de teorías cada vez más fundamentales no continúen indefinidamente ni

tampoco lleguen a un término. El filósofo de Cambridge Michael Redhead sugiere que estas flechas podrían cerrarse sobre sí mismas<sup>lxxxviii</sup>. Señala que la interpretación ortodoxa de Copenhague de la mecánica cuántica requiere la existencia de un mundo macroscópico de observadores y aparatos de medición que, a su vez, se explica en términos de mecánica cuántica. Creo que esta opinión proporciona un ejemplo más de lo que está mal en la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica y la diferencia entre la forma de tratar los fenómenos cuánticos y los observadores que los estudian. En la aproximación realista a la mecánica cuántica de Hugh Everett y otros, existe solamente una función de onda que describe todos los fenómenos, incluyendo experimentos y observadores, y las leyes fundamentales son las que describen la evolución de esta función de onda.

Pero aún más radical es la sugerencia de que en el fondo encontraremos que no hay ley en absoluto<sup>lxxxix</sup>. Mi amigo y maestro John Wheeler ha sugerido en ocasiones que no existe ley fundamental y que todas las leyes que estudiamos hoy son impuestas en la naturaleza por el modo en que hacemos observaciones<sup>xc</sup>. Siguiendo líneas algo diferentes, el teórico de Copenhague Holger Nielsen ha propuesto una «dinámica aleatoria» según la cual, cualquiera que sea lo que supongamos sobre la naturaleza a muy cortas distancias o muy altas energías, los fenómenos accesibles en nuestros laboratorios tendrán el mismo aspecto<sup>xci</sup>.

Me parece sencillamente que tanto Wheeler como Nielsen sólo están

desplazando el problema de las leyes finales. El mundo sin ley de Wheeler sigue necesitando metaleyas que nos digan de qué forma nuestras observaciones imponen regularidades en la naturaleza, y entre dichas metaleyas está la propia mecánica cuántica. Análogamente, Nielsen necesita algún tipo de metaley para explicar cómo cambia la apariencia de la naturaleza cuando cambiamos la escala de distancias y energías a las que hacemos nuestras mediciones, y para esto supone la validez de lo que se denomina ecuaciones del grupo de renormalización, cuyo origen en un mundo sin ley es ciertamente problemático. Espero que todos los intentos de prescindir de leyes fundamentales de la naturaleza, si tienen algún éxito, simplemente acabarán en la introducción de metaleyas que describan cómo han surgido las que *ahora* llamamos leyes.

Existe otra posibilidad que me parece más probable y mucho más inquietante. Quizá existe una teoría final, un conjunto simple de principios de los que surgen todas las flechas explicativas, pero nunca sabremos cuál es. Por ejemplo, puede ocurrir sencillamente que los seres humanos no seamos suficientemente inteligentes para descubrir o entender la teoría final. Es posible adiestrar perros para hacer todo tipo de cosas inteligentes, pero dudo que cualquiera pueda adiestrar a un perro para utilizar la mecánica cuántica en el cálculo de los niveles de energía atómica. La mejor razón para esperar que nuestra especie sea intelectualmente capaz de seguir los futuros progresos es nuestra maravillosa capacidad para unir nuestros cerebros a través del lenguaje, pero quizá esto no sea bastante. Eugene Wigner ha advertido que «no tenemos derecho a

esperar que nuestro intelecto pueda formular conceptos perfectos para la comprensión completa de los fenómenos de la naturaleza inanimada<sup>xcii</sup>». Hasta ahora, afortunadamente, no parece que estemos llegando al fin de nuestros recursos intelectuales. En física, en cualquier caso, cada nueva generación de estudiantes licenciados parece más brillante que la precedente.

Una preocupación mucho más agobiante es que el esfuerzo por descubrir las leyes finales pueda quedar detenido por falta de dinero. Tenemos un anticipo de este problema en el reciente debate en los Estados Unidos sobre si terminar o no el Supercolisionador. Su coste de 8000 millones de dólares a lo largo de una década está ciertamente dentro de las capacidades de nuestro país, pero incluso los físicos de altas energías dudarían en proponer un futuro acelerador mucho más caro.

Más allá de las cuestiones sobre el modelo estándar que esperamos que sean respondidas por el Supercolisionador, existe un nivel de cuestiones más profundas que tienen que ver con la unificación de las interacciones fuerte, electrodébil y gravitatoria, cuestiones que no pueden ser abordadas directamente con ningún acelerador actualmente concebible. La energía de Planck, realmente fundamental, en la que todas estas cuestiones podrían ser exploradas experimentalmente, está cien billones de veces por encima de la energía que estaría disponible en el Supercolisionador Superconductor. Es a la energía de Planck a la que se espera que todas las fuerzas de la naturaleza estén unificadas. Asimismo, ésta es aproximadamente la energía que, según las modernas teorías de



cuerdas, es necesaria para excitar los primeros modos de vibración de las cuerdas, por encima de los modos más bajos que observamos como quarks y fotones ordinarios y demás partículas del modelo estándar. Por desgracia, tales energías parecen totalmente fuera de nuestro alcance. Incluso si la totalidad de los recursos económicos de la raza humana fuese dedicada a esta tarea, hoy no sabríamos cómo construir una máquina que pudiera acelerar partículas a semejantes energías. No es que la energía misma sea inalcanzable: la energía de Planck es aproximadamente la misma que la energía química almacenada en un depósito de gasolina de automóvil. El problema consiste en concentrar toda esta energía en un solo protón o electrón. Podemos aprender a construir tales aceleradores de formas muy diferentes de las que se emplean hoy, quizá utilizando gases ionizados para ayudar a transferir la energía de potentes haces de radiación láser a partículas cargadas individuales, pero aun así el ritmo de reacción de las partículas a esta energía sería tan pequeño que los experimentos podrían ser imposibles. Es más probable que avances decisivos en la teoría o en otro tipo de experimentos eliminen algún día la necesidad de construir aceleradores de energías cada vez más altas.

Mi opinión es que existe una teoría final, y que somos capaces de descubrirla. Puede ser que experimentos en el Supercolisionador proporcionen una nueva información tan esclarecedora que los teóricos sean capaces de completar la teoría final sin tener que estudiar partículas al nivel de la energía de Planck. Incluso podemos ser capaces de encontrar un candidato para tal teoría final

entre las teorías de cuerdas actuales.

¡Qué extraño sería que la teoría final fuera descubierta durante nuestra vida! El descubrimiento de las leyes finales de la naturaleza marcará una discontinuidad en la historia del intelecto humano, la más abrupta que haya ocurrido desde el comienzo de la ciencia moderna en el siglo XVII. ¿Podemos imaginar ahora cómo sería?

Aunque no es difícil imaginar una teoría final que no *tenga* una explicación en términos de principios más profundos, es muy difícil imaginar una teoría final que no *necesite* tal explicación. Cualquiera que pueda ser la teoría final, ciertamente no será *lógicamente* inevitable. Incluso si la teoría final resultara ser una teoría de cuerdas que pueda expresarse en unas pocas ecuaciones sencillas, e incluso si pudiéramos demostrar que ésta es la única teoría mecanocuántica posible que puede describir la gravitación junto con las demás fuerzas sin incoherencias matemáticas, aún tendríamos que preguntarnos por qué debería existir algo como la gravitación y por qué la naturaleza debería obedecer las reglas de la mecánica cuántica. ¿Por qué el universo no consiste simplemente en partículas puntuales que se mueven incesantemente según las leyes de la mecánica newtoniana? ¿Por qué existe cualquier cosa? Redhead representa probablemente una opinión mayoritaria al negar que «sea creíble el propósito de una fundamentación de la ciencia autojustificativa *a priori*<sup>xciii</sup>».

Del lado contrario, Wheeler comentó en cierta ocasión que, cuando llegemos a las leyes finales de la naturaleza, nos preguntaremos por qué no eran obvias desde el principio. Sospecho que Wheeler

puede estar en lo cierto, pero sólo porque entonces habremos sido adiestrados por siglos de éxitos y fracasos científicos para encontrar estas leyes obvias. Incluso así, aunque sea de una forma atenuada, pienso que la vieja pregunta ¿por qué? aún seguirá existiendo. El filósofo de Harvard Robert Nozick ha discutido este problema y sugerido que, en lugar de tratar de deducir la teoría final a partir de la lógica pura, deberíamos buscar argumentos que la hicieran algo más satisfactoria que un simple hecho bruto<sup>xciv</sup>.

En mi opinión, nuestra mejor esperanza a este respecto es mostrar que la teoría final, aunque no sea lógicamente inevitable, es lógicamente *independiente*. Es decir, pudiera suceder que, aunque siempre seamos capaces de imaginar otras teorías que son totalmente diferentes de la verdadera teoría final (como el aburrido mundo de las partículas gobernadas por la mecánica newtoniana), la teoría final que descubramos sea tan rígida que no haya forma de modificarla en ninguna medida, por pequeña que sea, sin que la teoría lleve a absurdos lógicos. En una teoría lógicamente independiente cualquier constante de la naturaleza podría calcularse a partir de primeros principios; un pequeño cambio en el valor de cualquier constante destruiría la consistencia de la teoría. La teoría final sería como una pieza de porcelana fina que no puede deformarse sin hacerse añicos. En este caso, aunque podamos seguir sin saber por qué la teoría final es verdadera, sabríamos, sobre la base de la matemática y la lógica puras, por qué la verdad no es ligeramente diferente.

Esto no es solamente una posibilidad; estamos ya en el camino

hacia tal teoría lógicamente independiente. Los principios físicos más fundamentales conocidos son las reglas de la mecánica cuántica que subyacen en todo lo que sabemos sobre la materia y sus interacciones. La mecánica cuántica no es lógicamente inevitable; no parece que haya nada lógicamente imposible en su predecesora, la mecánica de Newton. Pero los mejores esfuerzos de los físicos han fracasado en descubrir cualquier forma de cambiar las reglas de la mecánica cuántica *en una pequeña medida* sin incurrir en desastres lógicos, tales como probabilidades que llegan a ser números negativos.

Pero la mecánica cuántica en sí misma no es una teoría física completa. No nos dice nada sobre las partículas y fuerzas que pueden existir. Tome cualquier libro de texto de mecánica cuántica; usted encontrará como ejemplos ilustrativos una sorprendente variedad de partículas y fuerzas hipotéticas, muchas de las cuales no se parecen a nada de lo que existe en el mundo real, pero todas son perfectamente consistentes con los principios de la mecánica cuántica y pueden ser utilizadas para que los estudiantes adquieran práctica en la aplicación de estos principios. La variedad de teorías posibles se hace mucho más pequeña si consideramos sólo teorías mecanocuánticas compatibles con la teoría de la relatividad especial. Muchas de estas teorías pueden ser lógicamente descartadas debido a que implican absurdos tales como energías infinitas o ritmos de reacción infinitos. Incluso así sigue existiendo una plétora de teorías lógicamente posibles, tal como la teoría de las fuerzas nucleares fuertes conocida como cromodinámica cuántica,

con ninguna cosa en el universo salvo quarks y gluones. Pero la mayoría de estas teorías queda descartada si insistimos también en que deben englobar la gravitación. Es posible que seamos capaces de demostrar matemáticamente que estos requisitos dejan sólo una teoría mecanocuántica lógicamente posible, quizá una única teoría de cuerdas. Si esto es así, entonces, aunque aún seguiría existiendo un gran número de otras teorías finales lógicamente posibles, habría sólo una que describiera algo remotamente parecido a nuestro propio mundo.

Pero ¿por qué la teoría final debería describir algo parecido a nuestro propio mundo? La explicación podría encontrarse en lo que Nozick ha llamado el *principio de fecundidad*. Este principio afirma que todos los diferentes universos lógicamente aceptables existen en cierto sentido, cada uno de ellos con su propio conjunto de leyes fundamentales. El propio principio de fecundidad no es explicado por nada, pero al menos tiene cierta agradable autoconsistencia; como dice Nozick, el principio de fecundidad establece «que todas las posibilidades se realizan, al mismo tiempo que el propio principio es una de estas posibilidades».

Si este principio es verdadero, entonces nuestro propio mundo mecano cuántico existe, pero también existe el mundo newtoniano de partículas orbitando incesantemente, como existen los mundos que no contienen nada en absoluto, y así también otros innumerables mundos que no podemos siquiera imaginar. No se trata sólo de que las llamadas constantes de la naturaleza varíen de una parte a otra del universo o de una época a otra o de un término

en la función de onda a otro. Como hemos visto, todas las posibilidades podrían realizarse como consecuencia de alguna teoría realmente fundamental como la cosmología cuántica, pero eso aún nos dejaría con el problema de comprender por qué la teoría fundamental es la que es. En lugar de ello, el principio de fecundidad supone que existen universos completamente diferentes y sometidos a leyes completamente diferentes. Pero, si estos otros universos son completamente inaccesibles e incognoscibles, entonces la afirmación de que existen parecería no tener consecuencias, excepto la de evitar la pregunta de por qué no existen. El problema parece residir en que estamos tratando de ser lógicos acerca de una cuestión que no es realmente susceptible de razonamiento lógico: la cuestión acerca de qué debería o no despertar nuestra capacidad de asombro.

El principio de fecundidad podría proporcionar además otra forma de justificar la utilización del razonamiento antrópico para ayudar a explicar por qué las leyes finales de *nuestro* universo son como son. Existirían muchos tipos de universos concebibles cuyas leyes o historia les hicieran inhóspitos para la vida inteligente, pero cualquier científico que pregunta por qué el mundo es como es tendría que estar viviendo en uno de estos universos, uno en el que la vida inteligente *pudo* aparecer. De este modo podemos inmediatamente descartar el universo gobernado por la física newtoniana (por una razón, no existirían átomos estables en semejante mundo), o el universo que no contiene nada en absoluto. Como una posibilidad extrema, es posible que sólo haya una teoría

lógicamente independiente, sin *ninguna* constante sin determinar, que sea compatible con la existencia de seres inteligentes capaces de maravillarse con la teoría final. Si pudiera demostrarse esto, entonces estaríamos lo más cerca que se pudiera esperar de una explicación satisfactoria de por qué el mundo es como es.

¿Cuál sería el efecto del descubrimiento de una teoría final semejante? Por supuesto, una respuesta definitiva tendrá que esperar hasta que conozcamos la teoría final. Podemos descubrir cosas sobre el gobierno del mundo que nos resulten tan sorprendentes como las reglas de la mecánica newtoniana hubieran resultado a Tales. Pero de algo podemos estar seguros: el descubrimiento de una teoría final no acabaría con la empresa de la ciencia. Además de los problemas que necesitan ser estudiados con propósitos técnicos o médicos, seguiría habiendo una gran cantidad de problemas de ciencia pura que serían estudiados porque los científicos esperan que estos problemas tengan bellas soluciones. Precisamente ahora, sin salir de la física, existen fenómenos como la turbulencia y la superconductividad a alta temperatura de los que se espera que tengan profundas y bellas explicaciones. Nadie sabe cómo se formaron las galaxias o cómo se inició el mecanismo genético o cómo se almacenan los recuerdos en el cerebro. No es probable que ninguno de estos problemas sea afectado por el descubrimiento de una teoría final.

Por el contrario, el descubrimiento de una teoría final puede tener efectos que vayan mucho más allá de los límites de la ciencia. Hoy día las mentes de muchas personas son atormentadas con

diferentes concepciones irracionales, que van desde las relativamente inocuas supersticiones como la astrología hasta las ideologías del tipo más nefasto. El hecho de que las leyes fundamentales de la naturaleza permanezcan oscuras hace mucho más fácil que la gente conciba esperanzas de que algún día sus propias irracionalidades favoritas encontrarán un lugar respetable dentro de la estructura de la ciencia. Sería una locura esperar que cualquier descubrimiento de la ciencia pudiera por sí mismo depurar a la raza humana de todas sus concepciones erróneas, pero, al menos, el descubrimiento de las leyes finales de la naturaleza dejaría menos lugar en la imaginación para las creencias irracionales.

No obstante, con el descubrimiento de una teoría final podemos lamentar que la naturaleza se haya hecho más vulgar, menos llena de misterio y maravilla. Algo similar a esto ha sucedido antes. A lo largo de una gran parte de la historia humana nuestros mapas de la Tierra han mostrado grandes espacios ignotos que la imaginación podía llenar con dragones y ciudades doradas y antropófagos. La búsqueda del conocimiento tuvo mucho que ver con la exploración geográfica. Cuando el Ulises de Tennyson se dispuso a «seguir el conocimiento como una estrella que se apaga, más allá de los más altos límites del pensamiento humano», zarpó hacia el Atlántico desconocido, «más allá de la puesta del sol, y de los baños de todas las estrellas del Poniente». Pero hoy día cualquier hectárea de la superficie terrestre ha sido representada en mapas, y los dragones han desaparecido. Con el descubrimiento de las leyes finales



nuestros sueños se reducirán otra vez. Habrá problemas científicos sin fin y quedará todo un universo por explorar, pero sospecho que los científicos del futuro nos envidiarán un poco a los físicos de hoy porque estamos aún en viaje hacia el descubrimiento de las leyes finales.

## Capítulo 10

### ¿Y qué pasa con Dios?

*—Sabes —dijo Port—, y su voz sonó irreal, como ocurre después de una larga pausa en un lugar perfectamente silencioso—, el cielo aquí es muy extraño. A veces, cuando lo miro, tengo la sensación de que es algo sólido, allá arriba, que nos protege de lo que hay detrás.*

*Kit se estremeció ligeramente:*

*—¿De lo que hay detrás?*

*—Sí.*

*—Pero ¿qué hay detrás? —preguntó Kit con un hilo de voz.*

*—Nada, supongo. Solamente oscuridad. La noche absoluta.*

*PAUL BOWLES, El cielo protector*

«Los cielos cuentan la gloria de Dios, la obra de sus manos anuncia el firmamento<sup>xcv</sup>». Para el rey David, o quienquiera que escribió este salmo, las estrellas deben haber parecido evidencia visible de un orden de existencia más perfecto, muy diferente de nuestro sombrío mundo sublunar de rocas, piedras y árboles. Desde los días de

David, el Sol y las demás estrellas han perdido su estatus especial; sabemos que son esferas de gas incandescente, que se mantienen compactas por la gravitación y que no colapsan porque a ello se opone la presión debida al calor que se genera en las reacciones termonucleares de su interior. Lo que las estrellas nos dicen sobre la gloria de Dios no es ni más ni menos que lo que nos dicen las piedras del suelo que nos rodea.

Si hubiera algo que pudiéramos descubrir en la naturaleza que nos *diese* alguna intuición especial sobre la obra de Dios, tendrían que ser las leyes finales de la naturaleza. Conociendo estas leyes, estaríamos en posesión del libro de las reglas que gobiernan las estrellas y las piedras y cualquier otra cosa. Por eso, es natural que Stephen Hawking se refiriese a las leyes de la naturaleza como «la mente de Dios<sup>xcvi</sup>». Otro físico, Charles Misner, utilizó un lenguaje similar al comparar las perspectivas de la física y la química: «El químico orgánico, en respuesta a la pregunta de por qué existen noventa y dos elementos, y cuándo fueron producidos, puede decir: “El hombre del despacho de al lado lo sabe”. Pero cuando se le pregunta al físico por qué el universo está construido con arreglo a ciertas leyes físicas y no otras puede muy bien responder: “Dios lo sabe<sup>xcvii</sup>”. Einstein comentó una vez a su asistente Ernst Straus que «lo que realmente me interesa es si Dios tuvo alguna elección al crear el mundo<sup>xcviii</sup>». En otra ocasión describió el propósito de la empresa física como:

no sólo conocer cómo es la naturaleza y cómo se llevan a cabo sus transacciones, sino también alcanzar, en la medida de lo posible, el

utópico y aparentemente arrogante propósito de conocer por qué *la naturaleza es así y no de otra forma...* De este modo uno tiene la sensación, por así decirlo, de que el mismo Dios no pudo haber dispuesto estas conexiones de una forma diferente de la que existe... Éste es el elemento prometeico de la experiencia científica... Aquí ha radicado siempre para mí la magia particular del esfuerzo científico<sup>xcix</sup>.

La religión de Einstein era tan vaga que imagino que entendía esto de forma metafórica, como lo sugiere su «por así decirlo». El hecho de que esta metáfora resulte natural para los físicos se debe indudablemente al carácter tan fundamental de la física. El teólogo Paul Tillich observó en cierta ocasión que, entre los científicos, sólo los físicos parecen capaces de utilizar la palabra «Dios» sin apuro<sup>c</sup>. Cualquiera que sea la religión de uno, o la falta de ella, resulta una metáfora irresistible el hablar de las leyes finales de la naturaleza en términos de la mente de Dios.

Yo encontré esta conexión una vez en un lugar singular, en el Rayburn House Office Building de Washington. Cuando testifiqué allí en 1987 a favor del proyecto del Supercolisionador Superconductor (SSC) ante el Comité de Ciencia, Espacio y Tecnología de la Cámara de Representantes, describí cómo en nuestro estudio de las partículas elementales estamos descubriendo leyes que cada vez se hacen más coherentes y universales, y cómo estamos empezando a sospechar que ello no es simplemente un accidente, que existe una belleza en estas leyes que refleja algo que está incorporado en la estructura del universo a un nivel muy

profundo. Después de que yo hiciera estos comentarios hubo comentarios de otros testigos y preguntas de los miembros del Comité. A ello siguió un diálogo entre dos miembros del Comité, el representante Harris W. Fawell, republicano de Illinois, quien generalmente había sido favorable al proyecto del Supercolisionador, y el representante Don Ritter, republicano de Pennsylvania, un antiguo ingeniero metalúrgico que es uno de los mayores oponentes al proyecto en el Congreso:

MR. FAWELL:... Muchas gracias. Agradezco el testimonio de todos ustedes. Creo que fue excelente. Si alguna vez tuviera que explicar todas las razones por las que el SSC es necesario estoy seguro que acudiría a su testimonio. Sería de mucha ayuda. Quisiera a veces que dispusiéramos de alguna palabra que pudiera decirlo todo y eso es algo imposible. Creo que quizá usted, doctor Weinberg, se acercó bastante a ello y no estoy seguro, pero capté esta idea. Usted dijo que sospecha que no es en absoluto un accidente el que existan reglas que gobiernan la materia y yo añadí ¿nos llevaría esto a descubrir a Dios? Yo estoy seguro que usted no hizo esta afirmación, pero ¿ciertamente nos haría capaces de entender tanto sobre el universo?

MR. RITTER: ¿Me cede la palabra su señoría? Si su señoría me la cede por un momento yo diré...

MR. FAWELL: No estoy seguro de que quiera hacerlo.

MR. RITTER: Si esta máquina hace eso, yo estoy dispuesto a rectificar y a apoyarla<sup>153</sup>.

Tuve el buen sentido de quedarme al margen de esta discusión, porque yo no creía que los congresistas quisiesen saber lo que pensaba sobre descubrir a Dios en el SSC y tampoco me parecía que hacerles saber lo que yo pensaba sobre esto fuera útil para el proyecto.

Algunas personas tienen una idea de Dios tan amplia y flexible que es inevitable que encuentren a Dios dondequiera que lo buscan. Se oye decir que «Dios es lo último» o «Dios es la naturaleza» o «Dios es el universo». Por supuesto, como sucede con cualquier otra palabra, podemos dar a la palabra «Dios» cualquier significado que queramos. Si usted quiere decir que «Dios es energía» entonces usted puede encontrar a Dios en un trozo de carbón. Pero, si las palabras han de tener valor para nosotros, deberíamos respetar la forma en que han sido utilizadas históricamente, y especialmente deberíamos mantener las distinciones que impiden que los significados de unas palabras se confundan con los significados de otras.

En este espíritu, me parece que si la palabra «Dios» tiene que sernos de utilidad, debería tomarse en el sentido de un Dios interesado, un creador y legislador que ha establecido no sólo las leyes de la naturaleza y del universo sino también patrones del bien y del mal, alguna personalidad que está interesada en nuestras acciones; algo,

---

<sup>153</sup> Esto está tomado de las transcripciones inéditas de las audiencias. Los congresistas, a diferencia de los testigos, tienen el privilegio de editar sus comentarios en el *Congressional Record*.

en resumen, a lo que fuera apropiado rendir culto<sup>154</sup>. Éste es el Dios que ha importado a los hombres y mujeres a lo largo de la historia. Los científicos y otras personas a veces utilizan la palabra «Dios» en un sentido tan abstracto y vacío que apenas se distingue de las leyes de la naturaleza. Einstein dijo en cierta ocasión que creía en «el Dios de Spinoza que se muestra a sí mismo en la ordenada armonía de lo que existe, y no en un Dios interesado en los destinos y acciones de los seres humanos<sup>ci</sup>». Pero ¿qué posible diferencia supone para alguien el que utilicemos la palabra «Dios» en lugar de «orden» o «armonía», excepto quizá para evitar la acusación de no tener ningún Dios? Por supuesto, cualquiera es libre de utilizar la palabra «Dios» de este modo, pero me parece que esto hace el concepto de Dios no ya falso sino simplemente fútil.

¿Encontraremos en las leyes finales de la naturaleza un Dios interesado? Parece casi absurdo el hacer esta pregunta, no sólo porque todavía no conocemos las leyes finales sino, en mayor medida, porque es difícil imaginar siquiera que podamos estar en posesión de principios últimos que no necesitan ninguna explicación basada en principios más profundos. Pero, por prematura que pueda ser la pregunta, apenas podríamos dejar de maravillarnos si encontráramos una respuesta a nuestras preguntas más profundas, cualquier signo de las obras de un Dios interesado, en una teoría final. Creo que no lo haremos.

Toda nuestra experiencia a lo largo de la historia de la ciencia ha ido en la dirección opuesta, hacia una gélida impersonalidad de las

---

<sup>154</sup> Debería quedar claro que al discutir estas cuestiones estoy hablando sólo en mi propio nombre, y que en este capítulo no pretendo tener ninguna competencia especial.

leyes de la naturaleza. El primer gran paso en este camino fue la desmitificación de los cielos. Todo el mundo conoce las figuras clave: Copérnico, que propuso que la Tierra no está en el centro del universo; Galileo, que hizo plausible el que Copérnico tuviera razón<sup>155</sup>; Bruno, que conjeturó que el Sol es solamente uno entre un gran número de estrellas; y Newton, que demostró que las mismas leyes del movimiento y la gravitación se aplican al Sistema Solar y a los cuerpos terrestres. Pienso que el momento clave fue la observación de Newton de que la misma ley de gravitación gobierna el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y la caída de un cuerpo en la superficie de la Tierra<sup>156</sup>. En nuestro siglo, la desmitificación de los cielos fue llevada un paso más adelante por el astrónomo norteamericano Edwin Hubble. Midiendo la distancia a la nebulosa Andrómeda, Hubble demostró que ésta, y por inferencia miles de otras nebulosas similares, no eran sólo partes externas a nuestra galaxia sino galaxias de propio derecho, tan impresionantes como la nuestra. Los cosmólogos modernos hablan incluso de un principio copernicano: la regla que establece que no puede tomarse en serio ninguna teoría cosmológica que coloque a nuestra propia galaxia en un lugar especial en el universo.

---

<sup>155</sup> El trabajo de Galileo sobre el movimiento demostró que nosotros no sentimos el movimiento de la Tierra en torno al Sol. Asimismo, su descubrimiento de las lunas de Júpiter proporcionó un ejemplo de un tipo de sistema solar en miniatura. La prueba reina llegó con el descubrimiento de las fases de Venus, que no se ajustaba con lo que sería de esperar si tanto Venus como el Sol orbitasen en torno a la Tierra.

<sup>156</sup> Al orbitar en torno a la Tierra en lugar de continuar en línea recta hacia el espacio exterior, la Luna adquiere en efecto una componente de velocidad dirigida hacia la Tierra de 2,7 milímetros por segundo cada segundo. La teoría de Newton explicó que esto es tres mil seiscientos veces menor que la aceleración de la caída de una manzana en Cambridge, porque la Luna está sesenta veces más lejos que Cambridge del centro de la Tierra y la aceleración debida a la gravedad decrece como la inversa del cuadrado de la distancia.



También la vida ha sido desmitificada. Justus von Liebig y otros químicos orgánicos de principios del siglo XIX demostraron que no había impedimento para la síntesis en el laboratorio de compuestos químicos como el ácido úrico, que están asociados con la vida. Más importantes fueron Charles Darwin y Alfred Russel Wallace, quienes demostraron cómo pudieron evolucionar las maravillosas capacidades de los seres mediante selección natural sin un plan o guía externo. El proceso de desmitificación se ha acelerado, en este siglo, con el éxito continuado de la bioquímica y la biología molecular en la explicación del funcionamiento de los seres vivos.

La desmitificación de la vida ha tenido un efecto mucho mayor sobre las sensibilidades religiosas de lo que lo haya tenido cualquier descubrimiento de la ciencia física. No es sorprendente que sea este reduccionismo en biología y en la teoría de la evolución, más que los descubrimientos de la física y la astronomía, el que continúa provocando la oposición más intransigente.

Incluso del lado de los científicos se escuchan ocasionales indicios de vitalismo, la creencia en procesos biológicos que no pueden ser explicados en términos de física y química. En este siglo, los biólogos (incluyendo los antirreduccionistas como Ernst Mayr) se han mantenido generalmente al margen del vitalismo, pero en una fecha tan reciente como 1944 Erwin Schrödinger argumentaba en su bien conocido libro *¿Qué es la vida?* que «se conoce lo suficiente sobre la estructura material de la vida para decir exactamente por qué la física actual no puede explicar la vida». Su razón era que la información genética que gobierna los organismos vivos es

demasiado estable para encajar en el mundo de las fluctuaciones continuas descritas por la mecánica cuántica y la mecánica estadística. El error de Schrödinger fue señalado por Max Perutz, el biólogo molecular que trabajó entre otras cosas en la estructura de la hemoglobina: Schrödinger había ignorado la estabilidad que puede producirse mediante el proceso químico conocido como catálisis enzimática<sup>cii</sup>.

Quizá el más respetable crítico académico de la evolución sea actualmente el profesor Philip Johnson de la Facultad de Derecho de la Universidad de California<sup>ciii</sup>. Johnson acepta que la evolución ha ocurrido y que a veces se debe a la selección natural, pero argumenta que «no existe evidencia experimental incontrovertible» de que la evolución no esté guiada por algún plan divino. Por supuesto, nunca puede uno esperar el poder demostrar que ningún agente sobrenatural mueva los hilos en favor de ciertas mutaciones y en contra de otras. Pero casi lo mismo podría decirse de cualquier teoría científica. No hay nada en la aplicación acertada de las leyes del movimiento de Newton o de Einstein al Sistema Solar que nos impida suponer que, de cuando en cuando, algún cometa reciba un empujón de un agente divino. Parece bastante claro que Johnson plantea este punto no como una cuestión de imparcialidad y amplitud de criterios, sino por razones religiosas que le preocupan mucho en relación con la vida mientras que no le preocupan de la misma manera en relación con los cometas. Pero la única forma de proceder en cualquier tipo de ciencia es suponer que no hay intervención divina y ver hasta dónde puede uno llegar con esta

hipótesis.

Johnson argumenta que la evolución naturalista, «evolución que no implica ninguna intervención o guía por parte de un creador externo al mundo de la naturaleza», no proporciona de hecho una explicación muy buena del origen de las especies. Creo que aquí anda errado puesto que él no tiene la sensibilidad hacia los problemas que cualquier teoría científica tiene siempre al dar cuenta de lo que observamos. Incluso con tremendos errores, nuestros cálculos y observaciones están siempre basados en hipótesis que van más allá de la validez de la teoría que estamos tratando de verificar. Nunca hubo un tiempo en el que los cálculos basados en la teoría de la gravitación de Newton o cualquier otra teoría estuvieran en perfecto acuerdo con todas las observaciones. En los escritos de los paleontólogos y biólogos evolucionistas actuales podemos reconocer el mismo estado de cosas que nos resulta tan familiar en física; al utilizar la teoría naturalista de la evolución, los biólogos están trabajando con una teoría abrumadoramente fructífera, pero que todavía no ha concluido su trabajo de explicación. Me parece extraordinariamente importante descubrir que podemos llegar muy lejos en la explicación del mundo sin invocar intervenciones divinas, tanto en la biología como en las ciencias físicas.

No obstante, creo que Johnson tiene razón en otro aspecto. Él argumenta que hay una incompatibilidad entre la teoría naturalista de la evolución y la religión tal como se entiende generalmente, y reprende a los científicos y educadores que la niegan. Continúa

quejándose de que «la evolución naturalista es compatible con la existencia de Dios sólo si por esta palabra entendemos simplemente una causa primera que se retira de la actividad posterior después de establecer las leyes de la naturaleza y poner el mecanismo natural en movimiento».

No creo que la incompatibilidad entre la teoría moderna de la evolución y la creencia en un Dios interesado sea cuestión de lógica: uno puede imaginar que Dios estableció las leyes de la naturaleza y puso en marcha el mecanismo de la evolución con la intención de que, mediante la selección natural, usted y yo apareciéramos algún día; pero existe una incompatibilidad real de caracteres. Después de todo, la religión no surgió en las mentes de los hombres y mujeres que especulaban sobre las causas primeras infinitamente prescientes, sino en los corazones de aquellos que suspiraban por la continua intervención de un Dios interesado.

Los conservadores religiosos entienden, como sus oponentes liberales no parecen hacerlo a menudo, cuán altas están las espadas en el debate sobre la enseñanza de la evolución en las escuelas públicas. En 1983, poco después de llegar a Texas, fui invitado a testificar ante un comité del Senado de Texas sobre una regulación que prohibía la enseñanza de la teoría de la evolución en los libros de texto de las escuelas superiores financiados por el Estado, a menos de que se le diese el mismo énfasis al creacionismo. Uno de los miembros del comité me preguntó cómo sería posible que el Estado financiara la enseñanza de una teoría científica como la evolución que era tan corrosiva para la creencia

religiosa. Respondí que, del mismo modo que aquellos que están comprometidos emocionalmente con el ateísmo cometerían un error al dar a la evolución más importancia de lo que de otra forma sería apropiado en la enseñanza de la biología, así también sería incompatible con la Primera Enmienda dar a la evolución menos énfasis como un medio de proteger la creencia religiosa. Sencillamente no es tarea de las escuelas públicas el interesarse de una u otra forma en las implicaciones religiosas de las teorías científicas. Mi respuesta no satisfizo al senador porque él sabía tan bien como yo cuál sería el efecto de un curso de biología que dé un énfasis apropiado a la teoría de la evolución. Cuando yo salí de la sala del comité, él murmuró que «Dios sigue estando en el cielo». Quizá sea así, pero nosotros ganamos esa batalla; a los libros de texto de enseñanza media en Texas ya no sólo se les permite, sino que se les exige explicar la teoría moderna de la evolución, y sin ningún absurdo sobre el creacionismo. Pero hay muchos lugares (hoy especialmente en los países islámicos) donde esta batalla está aún por ganar y ni siquiera hay seguridad de que vaya a ser ganada.

Uno oye con frecuencia que no hay conflicto entre ciencia y religión. Por ejemplo, en una reseña del libro de Johnson, Stephen Jay Gould comenta que la ciencia y la religión no entran en conflicto, porque «la ciencia trata la realidad factual, mientras que la religión trata la moralidad humana<sup>civ</sup>». En muchas cosas tiendo a estar de acuerdo con Gould, pero creo que aquí va demasiado lejos; el significado de la religión se define por lo que la gente religiosa cree

realmente, y la gran mayoría de la gente religiosa del mundo se sorprendería de saber que la religión no tiene nada que ver con la realidad factual.

Pero la opinión de Gould está hoy día muy extendida entre científicos y liberales en materia de religión. Creo que esto representa una retirada importante de la religión de posiciones que en otro tiempo ocupó. Hubo un tiempo en el que la naturaleza parecía inexplicable sin una ninfa en cada arroyo y una dríade en cada árbol. Incluso ya en una época tan reciente como el siglo XIX, el diseño de las plantas y los animales era considerado como evidencia visible de un Creador. Siguen existiendo muchísimas cosas en la naturaleza que no podemos explicar, pero pensamos que conocemos los principios que gobiernan la forma en que actúan. Para encontrar hoy día el misterio real, uno tiene que buscar en la cosmología y en la física de partículas elementales. Para aquellos que no ven conflicto entre ciencia y religión, la retirada de la religión del terreno ocupado por la ciencia es casi completa.

A partir de esta experiencia histórica, yo conjeturaría que, aunque encontremos belleza en las leyes finales de la naturaleza, no encontraremos ningún estatus especial para la vida o la inteligencia. *A fortiori*, no encontraremos patrones de valor o de moralidad. Ni tampoco encontraremos indicios de ningún Dios que se preocupe de tales cosas. Quizá encontremos estas cosas en otra parte, pero no en las leyes de la naturaleza.

Tengo que admitir que a veces la naturaleza parece más bella de lo estrictamente necesario. Tras la ventana del despacho de mi casa

hay un almendro, frecuentado por una asamblea de pájaros ingeniosos: arrendajos azules, oropéndolas de pecho amarillo y, el más hermosos de todos, un ocasional cardenal rojo. Aunque entiendo bastante bien cómo evolucionaron las plumas brillantemente coloreadas a partir de una competencia por la búsqueda de compañero, es casi imposible dejar de imaginar que toda esta belleza fue de alguna forma puesta para nuestro beneficio. Pero el Dios de los pájaros y de los árboles tendría que ser también el Dios de las taras de nacimiento y del cáncer.

Las personas religiosas han discutido durante milenios la cuestión de la teodicea, el problema que plantea la existencia del sufrimiento en un mundo que se supone gobernado por un Dios bueno. Han encontrado soluciones ingeniosas basadas en varios planes divinos supuestos. No intentaré discutir tales soluciones, y mucho menos añadir una más de mi cosecha. El recuerdo del Holocausto me hace poco comprensivo respecto a los intentos de justificar el comportamiento de Dios para con el hombre. Si existe un Dios que tiene planes especiales para los seres humanos, se ha tomado mucho esfuerzo para ocultar Su interés por nosotros. A mí me parece poco delicado, si no impío, molestar a un Dios semejante con nuestras oraciones.

No todos los científicos estarán de acuerdo con mi fría visión de las leyes finales. No conozco a nadie que mantenga explícitamente que existe evidencia científica de un ser divino, pero varios científicos defienden un estatus especial en la naturaleza para la vida inteligente. Por supuesto, todo el mundo sabe que, como cuestión

práctica, la biología y la psicología tienen que ser estudiadas en sus propios términos, no en términos de la física de partículas elementales, pero esto no es señal de ningún estatus especial para la vida o la inteligencia; lo mismo es cierto de la química y la hidrodinámica. Si, pese a todo, encontráramos un papel especial para la vida inteligente en las leyes finales, en el punto de convergencia de las flechas explicativas, podríamos concluir perfectamente que el creador que estableció estas leyes estaba de alguna forma especialmente interesado en nosotros.

John Wheeler está impresionado por el hecho de que, según la interpretación estándar de Copenhague de la mecánica cuántica, no puede decirse que un sistema físico tenga ningún valor definido para magnitudes como la posición o la energía o el momento hasta que dichas magnitudes son medidas por algún aparato de un observador. Para Wheeler, se requiere algún tipo de vida inteligente para dar significado a la mecánica cuántica. Recientemente, Wheeler ha ido más lejos y ha propuesto que la vida inteligente no sólo debe aparecer, sino que debe continuar invadiendo cualquier parte del universo para que cada bit de información sobre el estado físico del universo sea finalmente observado. Creo que las conclusiones de Wheeler proporcionan un buen ejemplo de los peligros de tomar demasiado en serio la doctrina del positivismo, que dice que la ciencia debería interesarse sólo en cosas que pueden ser observadas. Otros físicos, entre los que me incluyo, prefieren otra forma, realista, de mirar la mecánica cuántica, basada en una función de onda que puede describir laboratorios y observadores



tanto como átomos y moléculas, y gobernada por leyes que no dependen materialmente de que existan o no observadores.

Algunos científicos dan mucha importancia al hecho de que algunas de las constantes fundamentales tienen valores que parecen especialmente bien ajustados para la aparición de vida inteligente en el universo. No está todavía claro si hay algo cierto en esta observación, pero, incluso si lo hay, ello no implica necesariamente la intervención de un propósito divino. En varias teorías cosmológicas modernas, las llamadas constantes de la naturaleza (tales como las masas de las partículas elementales) realmente varían de un lugar a otro, de un instante a otro o incluso de un término en la función de onda del universo a otro. Si esto fuera cierto, entonces, como hemos visto, cualquier científico que estudie las leyes de la naturaleza tendrá que estar viviendo en una parte del universo donde las constantes de la naturaleza tomen valores favorables para la evolución de vida inteligente.

A modo de analogía, supongamos que existe un planeta llamado Tierra-prima, que es en todo idéntico al nuestro excepto que en dicho planeta la humanidad desarrolló la ciencia de la física sin saber nada de astronomía. (Por ejemplo, uno podría imaginar que la superficie de Tierra-prima está continuamente cubierta de nubes). Igual que en la Tierra, los estudiantes en Tierra-prima encontrarán tablas de constantes fundamentales en las contracubiertas de sus libros de texto de física. En estas tablas figurarán la velocidad de la luz, la masa del electrón, y así sucesivamente, y también otra constante «fundamental», con un valor de 1,99 calorías de energía

por minuto y por centímetro cuadrado, que da la energía que alcanza la superficie de Tierra-prima procedente de alguna fuente externa desconocida. En la Tierra esta constante es llamada constante solar porque sabemos que esta energía procede del Sol, pero nadie en Tierra-prima tendría ninguna forma de saber de dónde procede esta energía o por qué esta constante toma este valor concreto. Algún físico en Tierra-prima podría notar que el valor observado de esta constante está especialmente bien ajustado para la aparición de la vida. Si Tierra-prima recibiera mucho más o mucho menos de 2 calorías por minuto y por centímetro cuadrado, el agua de los océanos no sería agua, sino vapor o hielo, dejando Tierra-prima sin agua líquida o un sustituto razonable en el que la vida pudiera haber evolucionado. El físico podría concluir que esta constante de 1,99 calorías por minuto y por centímetro cuadrado había sido ajustada de forma muy precisa por Dios para provecho del hombre. Los físicos más escépticos en Tierra-prima podrían argumentar que tales constantes iban a ser finalmente explicadas por las leyes finales de la física, y que simplemente se trata de un feliz accidente el que estas constantes tengan valores favorables para la vida. De hecho, ambos estarían equivocados. Cuando los habitantes de Tierra-prima finalmente desarrollan un conocimiento de la astronomía, aprenden que su planeta recibe 1,99 calorías por minuto por centímetro cuadrado porque, como la Tierra, resulta estar a alrededor de 150 millones de kilómetros de distancia de un Sol que produce 5600 millones de millones de millones de millones de calorías por minuto, pero ven también que existen otros planetas

más próximos a su Sol que son demasiado calientes para la vida y otros planetas más alejados de su Sol que son demasiado fríos para la vida, y sin duda otros muchos planetas que orbitan en torno a otras estrellas de los que sólo una pequeña proporción son apropiados para la vida. Cuando aprenden algo de astronomía, los físicos que polemizan en Tierra-prima comprenden finalmente que la razón por la que viven en un mundo que recibe aproximadamente 2 calorías por minuto y por centímetro cuadrado es sencillamente que no hay otro tipo de mundo donde ellos *pudieran* vivir. Nosotros, en nuestra parte del universo, quizá seamos como los habitantes de Tierra-prima antes de que ellos aprendan astronomía, pero con otras partes del universo en lugar de otros planetas ocultos a nuestra visión.

Iré más lejos. A medida que hemos descubierto principios físicos cada vez más fundamentales, éstos parecen tener cada vez menos que ver con nosotros. Para poner un ejemplo, en los primeros años veinte se pensaba que las únicas partículas elementales eran el electrón y el protón, que entonces se consideraban los ingredientes a partir de los cuales estábamos hechos nosotros y nuestro mundo. Cuando se descubrieron nuevas partículas, como el neutrón, se dio por supuesto al principio que éstas tenían que estar formadas por electrones y protones. Las cosas son hoy muy diferentes. Ya no estamos seguros de lo que entendemos al decir que una partícula es elemental, pero hemos aprendido la lección importante de que el hecho de que las partículas están presentes en la materia ordinaria no tiene nada que ver con lo fundamentales que sean. Casi todas

las partículas cuyos campos aparecen en el moderno modelo estándar de partículas e interacciones se desintegran tan rápidamente que están ausentes en la materia ordinaria y no juegan ningún papel en absoluto en la vida humana. Los electrones son una parte esencial de nuestro mundo cotidiano; las partículas llamadas muones y tauones apenas afectan a nuestras vidas; pero, en la forma en que aparecen en nuestras teorías, los electrones no parecen de ninguna manera más fundamentales que los muones o tauones. Dicho con más generalidad, nadie ha descubierto todavía ninguna correlación entre la importancia de *algo* para nosotros y su importancia en las leyes de la naturaleza.

Por supuesto, no es en los descubrimientos de la ciencia donde la mayoría de la gente habría esperado aprender algo sobre Dios. John Polkinghorne ha argumentado elocuentemente en favor de una teología «situada dentro de un área del discurso humano donde la ciencia también encuentra un lugar» que estaría basada en la experiencia religiosa de la revelación, de forma muy parecida a como la ciencia está basada en experimentos y observación<sup>cv</sup>. Aquellos que piensan que han tenido experiencias religiosas propias tienen que juzgar por sí mismos la calidad de dicha experiencia. Pero la gran mayoría de los adeptos a las religiones del mundo está confiando no en su propia experiencia religiosa, sino en revelaciones que supuestamente son experimentadas por otros. Podría pensarse que esto no es tan diferente de la situación de los físicos teóricos que confían en los experimentos de otros, pero existe una diferencia muy importante. Las intuiciones de miles de físicos individuales han

convergiendo hacia una satisfactoria (aunque incompleta) comprensión común de la realidad física. Por el contrario, las afirmaciones sobre Dios o cualquier otra cosa que hayan sido derivadas de la revelación religiosa apuntan en direcciones radicalmente diferentes. Después de miles de años de análisis teológico, no estamos ahora más cerca de una comprensión común de las lecciones de la revelación religiosa.

Existe otra diferencia entre la experiencia religiosa y el experimento científico. Las lecciones de la experiencia religiosa pueden resultar profundamente satisfactorias, en contraste con la abstracta e impersonal comprensión del mundo obtenida a partir de la investigación científica. A diferencia de la ciencia, la experiencia religiosa puede sugerir un significado para nuestras vidas, un papel que jugamos en el gran drama cósmico del pecado y la redención, y nos ofrece una promesa de algo que continúa después de la muerte. Simplemente por estas razones, las lecciones de la experiencia religiosa me parecen indeleblemente marcadas con el sello de la ilusión.

En mi libro de 1977, *Los primeros tres minutos*, fui bastante temerario para comentar que «cuanto más comprensible parece el universo, más sin sentido parece». Yo no quería decir que la ciencia nos enseñe que el universo no tiene sentido, sino más bien que el propio universo no sugiere ningún sentido. Me apresuré a añadir que teníamos varias maneras de inventar un sentido para nuestras vidas, incluyendo el intento de comprender el universo. Pero el daño estaba hecho: la frase me ha perseguido desde entonces<sup>cvi</sup>.

Recientemente, Alan Lightman y Roberta Braver publicaron entrevistas con veintisiete cosmólogos y físicos, a muchos de los cuales se les había preguntado al final de su entrevista qué pensaban de dicho comentario<sup>cvii</sup>. Con varios matices, diez de los entrevistados estaban de acuerdo conmigo y trece no lo estaban, pero, de esos trece, tres estaban en desacuerdo porque ellos no veían por qué nadie pudiese esperar que el universo tuviese un sentido. La astrónoma de Harvard Margaret Geller preguntaba: «... ¿Por qué debería tener un sentido? ¿Qué sentido? Sólo se trata de un sistema físico, ¿qué sentido tiene? Siempre me ha intrigado esta afirmación». El astrofísico de Princeton Jim Peebles comentaba: «Estoy dispuesto a creer que somos restos de un naufragio». (Peebles también sugirió que yo había tenido un mal día). Otro astrofísico de Princeton, Edwin Turner, estaba de acuerdo conmigo, pero sospechaba que yo había introducido el comentario para fastidiar al lector. Mi respuesta favorita fue la de mi colega de la Universidad de Texas, el astrónomo Gerard de Vaucouleurs. Dijo que encontraba mi comentario muy «nostálgico». Realmente lo era; nostálgico de un mundo en el que los cielos cuentan la gloria de Dios.

Hace aproximadamente siglo y medio, Matthew Arnold encontraba en el reflujo del océano una metáfora de la retirada de la fe religiosa, y escuchaba en el sonido del agua «la nota de la tristeza». Sería maravilloso descubrir en las leyes de la naturaleza un plan preparado por un Creador interesado en que los seres humanos jugasen algún papel especial. Yo encuentro triste dudar de que lo hagamos. Hay algunos entre mis colegas científicos que dicen que la

contemplación de la naturaleza les proporciona toda la satisfacción espiritual que otros han encontrado tradicionalmente en la creencia de un Dios interesado. Algunos de ellos incluso pueden realmente tener este sentimiento, Yo no. Y no creo que sirva de ayuda identificar, como hizo Einstein, las leyes de la naturaleza con algún tipo de Dios remoto y desinteresado. Cuanto más refinamos nuestra comprensión de Dios para hacer el concepto plausible, más sin sentido parece.

Entre los científicos de hoy probablemente yo sea algo atípico al preocuparme de estas cosas. En las raras ocasiones en que las conversaciones de sobremesa o de la hora del té tocan cuestiones de religión, la reacción más vigorosa expresada por la mayoría de mis colegas físicos es una tibia sorpresa y diversión por el hecho de que alguien se tome aún todo eso seriamente. Muchos físicos mantienen una afiliación nominal a la fe de sus padres, como una forma de identificación étnica y para uso en bodas y funerales, pero pocos de estos físicos parecen prestar ninguna atención a la teología de su religión nominal. Conozco dos físicos que trabajan en relatividad general que son devotos católicos, varios físicos teóricos que son judíos practicantes, un físico experimental que es cristiano converso, un físico teórico que es un musulmán convencido, y un físico matemático que ha tomado las órdenes sagradas en la Iglesia anglicana. Sin duda hay otros físicos profundamente religiosos a quienes no conozco o que guardan sus opiniones para sí mismos. Pero, por lo que puedo decir a partir de mis propias observaciones, la mayoría de los físicos no están hoy suficientemente interesados

en la religión siquiera para ser calificados como ateos practicantes. Los liberales religiosos están en cierto sentido aún más alejados en espíritu de los científicos de lo que lo están los fundamentalistas y otros conservadores religiosos. Al menos, los conservadores, como los científicos, te dicen que creen en lo que creen porque es verdadero, y no porque eso les hace buenos o felices. Muchos liberales religiosos parecen pensar hoy que diferentes personas pueden creer en cosas mutuamente excluyentes sin que ninguna de ellas esté equivocada, en la medida en que sus creencias «les sirven». Éste cree en la reencarnación, aquél en un cielo y un infierno; un tercero cree en la extinción del alma después de la muerte, pero nadie puede decirse equivocado en la medida en que todos obtienen un arrebató espiritual satisfactorio a partir de lo que ellos creen. Tomando prestada una frase de Susan Sontag, estamos rodeados de «piedad sin contenido<sup>cviii</sup>». Todo ello me recuerda una historia que se contaba le sucedió a Bertrand Russell, cuando en 1918 fue condenado a prisión por su oposición a la guerra. Siguiendo la rutina de la prisión, un carcelero preguntó a Russell cuál era su religión, y Russell dijo que él era un agnóstico. El carcelero pareció desconcertado por un momento, y más tarde se reanimó, comentando: «Supongo que está bien. Todos adoramos al mismo Dios, ¿no es así?».

A Wolfgang Pauli le preguntaron en cierta ocasión si pensaba que un artículo de física especialmente mal concebido era erróneo. Él contestó que semejante descripción sería demasiado amable: el artículo ni siquiera era falso. Casualmente pienso que los



conservadores religiosos están equivocados en lo que creen, aunque al menos ellos no han olvidado lo que realmente significa creer en algo. Pero creo que los religiosos liberales ni siquiera están equivocados.

Con frecuencia uno oye que la teología no es lo más importante de la religión; lo importante es cómo nos ayuda a vivir. Cosa extraña, ¡la existencia y naturaleza de Dios, de la gracia y el pecado, y del cielo y el infierno no son importantes! Me inclino a pensar que la gente no encuentra importante la teología de su propia supuesta religión porque les resulta imposible admitir que no creen nada de eso. Pero a lo largo de la historia y en muchas partes del mundo actual, la gente ha creído en una teología u otra, y para ellos ha sido muy importante.

Uno puede sentirse disgustado por la confusión intelectual del liberalismo religioso, pero es la religión dogmática conservadora la que hace daño. Por supuesto, también ha hecho grandes contribuciones morales y artísticas. Éste no es el lugar para discutir cuánto nos sorprende un balance entre estas contribuciones de la religión, por un lado, y la larga y cruel historia de las Cruzadas y la Guerra Santa y la Inquisición y los *pogroms*, por el otro. Pero quiero apuntar que, para deshacer este equilibrio, no es honesto suponer que las persecuciones religiosas y las guerras santas son perversiones de la verdadera religión. Suponer que lo son me parece un síntoma de una actitud muy extendida hacia la religión, consistente en un profundo respeto combinado con una profunda falta de interés. Muchas de las grandes religiones del mundo

enseñan que Dios exige una fe y una forma de culto particular. No sería sorprendente que *algunas* de las personas que toman seriamente estas enseñanzas considerasen sinceramente estos mandamientos divinos como incomparablemente más importantes que cualquier virtud meramente secular como la tolerancia, la compasión o la razón.

En Asia y África las fuerzas oscuras del fanatismo religioso están reuniendo fuerza, y la razón y la tolerancia no están a salvo ni siquiera en los estados laicos de Occidente. El historiador Hugh Trevor-Roper ha dicho que fue la expansión del espíritu de la ciencia en los siglos XVII y XVIII la que finalmente terminó con la quema de brujas en Europa<sup>cix</sup>. Quizá necesitemos confiar de nuevo en la influencia de la ciencia para mantener un mundo sano. No es la certeza del conocimiento científico la que lo hace apropiado para este papel, sino su *incertidumbre*. Viendo como los científicos cambian una y otra vez sus ideas sobre temas que pueden ser estudiados directamente en experimentos de laboratorio, ¿cómo puede uno tomar en serio los alegatos de la tradición religiosa o de los escritos sagrados de ciertos conocimientos sobre materias más allá de la experiencia humana?

Por supuesto, la ciencia ha hecho su propia contribución a las preocupaciones del mundo, pero generalmente dándonos los medios para matar a otros, no los motivos. Allí donde la autoridad de la ciencia ha sido invocada para justificar horrores, lo ha sido realmente sobre la base de perversiones de la ciencia, tales como el racismo nazi y la «eugenesia». Como ha dicho Karl Popper, «resulta

demasiado obvio que es el irracionalismo, y no el racionalismo, el que tiene la responsabilidad de toda la hostilidad y agresión nacionalista, tanto antes como después de las Cruzadas, pero yo no conozco ninguna guerra impulsada por un objetivo “científico” e inspirada por los científicos<sup>cx</sup>».

Por desgracia no creo que sea posible defender los modos de razonamiento científico mediante argumentos racionales. David Hume vio hace tiempo que al apelar a nuestra experiencia pasada de la ciencia fructífera estamos suponiendo la validez del propio modo de razonamiento que estamos tratando de justificar<sup>cx</sup>i. De la misma forma, todos los argumentos lógicos pueden ser derrotados por el simple rechazo de razonar lógicamente. Por lo tanto, no podemos dejar de lado esta pregunta: ¿por qué, si no encontramos el confort espiritual que deseamos en las leyes de la naturaleza, *no* deberíamos buscarlo en otra parte; en una autoridad espiritual de un tipo u otro, o en un voluntario cambio de fe?

La decisión de creer o no creer no está totalmente en nuestras manos. Yo podría ser más feliz y comportarme mejor si pensara que desciendo de los emperadores de la China, pero ningún esfuerzo de voluntad por mi parte puede hacerme creerlo, como tampoco puedo hacer voluntariamente que mi corazón deje de latir. Pero parece que muchas personas son capaces de ejercer cierto control sobre lo que creen y eligen creer lo que piensan que les va a hacer buenos o felices. La descripción más interesante que conozco de cómo puede funcionar este control aparece en la novela *1984* de George Orwell. El héroe, Winston Smith, ha escrito en su diario que «libertad es la

libertad de decir que dos más dos son cuatro». El inquisidor O'Brien toma esto como un desafío y se propone obligar a Smith a cambiar su idea. Sometido a tortura, Smith está perfectamente dispuesto a decir que dos más dos son cinco, pero no es eso lo que O'Brien espera. Finalmente, el dolor se hace tan insoportable que, para escapar de él, Smith trata de convencerse por un instante de que dos más dos son cinco. O'Brien está satisfecho por el momento y la tortura se suspende. De manera muy parecida, el dolor de enfrentarnos a la perspectiva de nuestra propia muerte y la muerte de los que amamos nos impulsa a adoptar creencias que aminoren este dolor. Si somos capaces de tratar de ajustar nuestras creencias de esta forma, entonces ¿por qué no hacerlo?

No puedo ver ninguna razón científica o lógica para no buscar el consuelo mediante un ajuste de nuestras creencias; sólo veo una razón moral, un sentido del honor. ¿Qué pensaríamos de alguien que trata de convencerse de que le tocará la lotería porque necesita el dinero desesperadamente? Alguien podría envidiarle sus grandes esperanzas, pero muchos otros pensarían que está fracasando en su papel de adulto y ser racional, de mirar las cosas como son. De la misma forma que cada uno de nosotros ha tenido que aprender, a medida que crecía, a resistir la tentación de las ilusiones acerca de las cosas ordinarias como las loterías, también nuestra especie ha tenido que aprender, a medida que crece, que no estamos jugando un papel estelar en ningún tipo de drama cósmico.

De todas formas, no quiero pensar ni por un minuto que la ciencia proporcionará alguna vez el consuelo que la religión ha ofrecido

frente a la muerte. La más bella afirmación de este desafío existencial que conozco se encuentra en *La historia eclesiástica de los ingleses*, escrita por Beda el Venerable alrededor del año 700. Beda cuenta cómo el rey Edwin de Northumbria convocó un consejo el año 627 para decidir la religión a adoptar en su reino, y cita el siguiente discurso de uno de los hombres principales del rey:

Majestad, cuando comparamos la vida presente del hombre sobre la Tierra con los tiempos que no conocemos, parece como el vuelo breve de un gorrión que cruza la sala de banquetes en la que vos estáis sentado a cenar en un día de invierno con vuestros nobles y consejeros. En el centro hay un fuego acogedor para calentar la sala; fuera ruge la tormenta de lluvia o nieve del invierno. El gorrión entra volando velozmente por una puerta de la sala y sale por otra. Mientras está dentro, está a salvo de la tormenta; pero tras unos pocos instantes de abrigo se pierde en el mundo invernal del que vino. También así, el hombre aparece en la Tierra para un breve periodo; pero de lo que fue antes de esta vida, o de lo que sigue, no sabemos nada<sup>cxii</sup>.

La tentación de creer con Beda y Edwin que debe haber algo para nosotros fuera de la sala del banquete es casi irresistible. El honor de resistir esta tentación es sólo un magro sustituto para el consuelo de la religión, pero no está totalmente desprovisto de satisfacción.

## Capítulo 11

### Ellis County, allá en el sur

*Mamás, no dejéis que vuestros hijos se hagan vaqueros.*

*No les dejéis tocar guitarras y conducir viejos camiones.*

*Haced que sean doctores y abogados y cosas así<sup>157</sup>.*

*ED y PATSY BRUCE*

Ellis County, en Texas, está en el corazón de lo que una vez fue la mayor zona de cultivo de algodón de todo el mundo. No es difícil encontrar señales de la vieja prosperidad del algodón en Waxahachie, la capital del condado. El centro de la ciudad hace gala de un gran palacio de justicia del condado de granito rojo que data de 1895, coronado con una gran torre del reloj, y partiendo de la plaza central existen varias calles con bonitas casas victorianas, similares a la Brattle Street de Cambridge, que se dirigen hacia el suroeste. Pero el condado es ahora mucho más pobre. Aunque todavía se cultiva algo de algodón, junto con trigo y maíz, los precios ya no son los que eran. Dallas está a cuarenta minutos al norte por la carretera Interestatal 35, y algunos prósperos ciudadanos de Dallas se han trasladado a Waxahachie porque les gusta la tranquilidad del campo, pero las florecientes industrias de aviación

---

<sup>157</sup> [Mommas, don't let your babies grow up to be cowboys. / Don't let 'em pick guitars and drive them old trucks. / Make 'em be doctors and lawyers and such].

y ordenadores de Dallas y Fort Worth no han llegado a Ellis County. En 1988 la tasa de desempleo en Waxahachie era de un 7 por 100. Por ello, se produjo un revuelo alrededor del palacio de justicia del condado cuando el 10 de noviembre de 1988 se anunció que Ellis County había sido elegido como la sede del mayor y más costoso instrumento científico del mundo, el Supercolisionador Superconductor.

La planificación del Supercolisionador había comenzado unos seis años antes. En aquella época el Departamento de Energía tenía entre manos un proyecto problemático conocido como ISABELLE, ya en construcción en el Laboratorio Nacional de Brookhaven en Long Island. Estaba previsto que ISABELLE había de suceder al ya existente acelerador de Fermilab en las afueras de Chicago como instalación puntera para la investigación experimental en física de partículas elementales en Norteamérica. Tras su comienzo en 1978, ISABELLE había sufrido un retraso de dos años debido a problemas en el diseño de las bobinas superconductoras que mantendrían los haces de protones de ISABELLE focalizados y en su trayectoria. Pero había otro problema más profundo con ISABELLE: aunque sería, cuando estuviese acabado, el acelerador más potente del mundo probablemente no sería bastante potente para responder a la pregunta para la que los físicos de partículas necesitaban más desesperadamente una respuesta: la pregunta de cómo se rompe la simetría que relaciona las interacciones débil y electromagnética.

La descripción de las fuerzas débil y electromagnética en el modelo estándar de las partículas elementales se basa en una simetría

*exacta* en la forma en que dichas fuerzas entran en las ecuaciones de la teoría. Pero, como hemos visto, esta simetría no está presente en las soluciones de las ecuaciones, es decir, en las propiedades de las partículas y de las propias fuerzas. Cualquier versión del modelo estándar que permita tal ruptura de simetría tendría que incluir características que todavía no han sido descubiertas experimentalmente: o bien nuevas partículas que interaccionan débilmente, llamadas partículas de Higgs, o bien nuevas fuerzas extrafuertes. Pero no sabemos cuál de estas características está realmente presente en la naturaleza, y esta incertidumbre bloquea nuestro progreso para avanzar más allá del modelo estándar.

El único modo seguro de zanjar esta cuestión es realizar experimentos en los que se disponga de un billón de voltios para la creación bien de partículas de Higgs, bien de partículas masivas que se mantienen unidas debido a fuerzas extrafuertes. Para este propósito resulta necesario dar a un par de protones que van a colisionar una energía total de alrededor de 40 billones de voltios, porque la energía de los protones se reparte entre los quarks y gluones de los que los protones están compuestos, y sólo alrededor de una cuarentava parte de la energía quedará disponible para la producción de nuevas partículas en la colisión de cualquier quark o gluón dentro de un protón con un quark o gluón dentro de otro protón. Además, no basta con disparar un haz de protones de 40 billones de voltios sobre un blanco en reposo, porque entonces casi toda la energía de los protones incidentes se perdería en el retroceso de los protones incididos. Para tener esperanzas de zanjar la



cuestión de la ruptura de la simetría electrodébil, uno necesita dos haces de protones de 20 billones de voltios que colisionen frontalmente, de modo que los momentos de los dos protones se cancelen y ninguna energía se pierda en el retroceso. Afortunadamente, uno puede confiar en que un acelerador que produzca intensos haces de protones de 20 billones de voltios y los haga colisionar será realmente capaz de zanjar la cuestión de la ruptura de la simetría electrodébil: o bien encontrará una partícula de Higgs o encontrará evidencia de nuevas fuerzas fuertes.

En 1982 comenzó a circular entre los físicos teóricos y experimentales la idea de que el proyecto ISABELLE debía ser desmantelado y sustituido por la construcción de un nuevo acelerador mucho más potente que fuera capaz de zanjar la cuestión de la ruptura de la simetría electrodébil. Ese mismo verano, un seminario oficioso de la American Physical Society realizó el primer estudio detallado de un acelerador que produciría haces de protones que colisionasen a energías de 20 billones de voltios, alrededor de unas cincuenta veces mayor que la energía prevista para ISABELLE. En febrero del año siguiente una subcomisión de la Comisión Asesora de Física de Altas Energías del Departamento de Energía, bajo la presidencia de Stanley Wojcicki, de Stanford, comenzó una serie de reuniones para examinar las opciones de un acelerador de la próxima generación. La subcomisión se reunió en Washington con el consejero científico de la presidencia, Jay Keyworth, quien les hizo llegar la idea de que la administración consideraría favorablemente un nuevo proyecto a

gran escala.

La subcomisión Wojcicki sostuvo su reunión culminante del 29 de junio al 1 de julio de 1983 en el Nevis Cyclotron Laboratory de la Universidad de Columbia en Westchester County. Los físicos reunidos recomendaron unánimemente la construcción de un acelerador que pudiera producir haces colisionantes de protones con energías de 10-20 billones de voltios. Por sí misma esta votación no atraería tanta atención; en cualquier campo hay generalmente muchos científicos que recomiendan nuevas instalaciones para su investigación. Mucho más importante fue una decisión, por diez votos a favor frente a siete en contra, que recomendaba detener el trabajo de ISABELLE. Fue una decisión tremendamente difícil, vigorosamente combatida por Nick Samios, el director de Brookhaven. (Posteriormente Samios calificó esta votación como «una de las decisiones más estúpidas tomadas nunca en física de altas energías<sup>cxiii</sup>»). No sólo esta decisión hizo más espectacular el apoyo de la subcomisión al nuevo gran acelerador, sino que hizo políticamente muy difícil que el Departamento de Energía continuase pidiendo al Congreso dinero para ISABELLE, y con ISABELLE detenido y ninguna otra cosa empezada el Departamento de Energía no tendría ningún proyecto de construcción en altas energías.

Diez días después las recomendaciones de la subcomisión Wojcicki fueron aprobadas unánimemente por su organismo matriz, la Comisión Asesora de Física de Altas Energías del Departamento de Energía. Por primera vez se le dio al nuevo acelerador propuesto su

nombre actual: el Supercolisionador Superconductor o, para abreviar, el SSC. El 11 de agosto el Departamento de Energía autorizó a la Comisión Asesora de Física de Altas Energías a establecer un plan para llevar a cabo la investigación y desarrollo necesario para el proyecto SSC, y el 16 de noviembre de 1983, Donald Hodel, el secretario de Energía, anunció la decisión de su Departamento de detener el trabajo en ISABELLE y pedir a las comisiones de créditos de la Cámara y el Senado autorización para reconducir los fondos de ISABELLE hacia el SSC<sup>158</sup>. La búsqueda del mecanismo de la ruptura de la simetría electrodébil no era en absoluto la única motivación del Supercolisionador. Normalmente los nuevos aceleradores, como los del CERN y Fermilab, se construyen con la esperanza de que, al pasar a nuevos niveles de energía, el acelerador revelará nuevos fenómenos iluminadores. Casi siempre esta esperanza ha sido satisfecha. Por ejemplo, el antiguo Sincrotrón de Protones fue construido en el CERN sin una idea clara de lo que encontraría; ciertamente nadie sabía que los experimentos utilizando los haces de neutrinos de este acelerador iban a descubrir las corrientes débiles neutras, un descubrimiento que en 1973 verificó nuestra actual teoría unificada de las fuerzas débil y electromagnética. Los grandes aceleradores actuales son descendientes de los ciclotrones de Ernst Lawrence en Berkeley a comienzos de los años treinta, que se construyeron para acelerar

---

<sup>158</sup> El túnel de ISABELLE va a ser utilizado ahora para el Colisionador de Iones Pesados Relativistas, un acelerador que servirá para estudiar las colisiones de núcleos atómicos pesados con el propósito de entender la materia nuclear más bien que los principios fundamentales de la física de partículas elementales. Se espera que el Colisionador de iones pesados esté listo en 1997.

protones hasta una energía suficientemente alta para vencer la repulsión eléctrica que rodea a los núcleos atómicos. Lawrence no tenía idea de lo que se encontraría cuando los protones penetrasen en el núcleo. En ocasiones, un descubrimiento particular puede ser identificado con antelación. Por ejemplo, el Bevatrón de Berkeley fue construido en los años cincuenta con la finalidad específica de tener la energía suficiente (unos 6000 millones de voltios) para poder crear antiprotones, las antipartículas de los protones que se encuentran en todos los núcleos atómicos ordinarios. El gran Colisionador electrón-positrón ahora en funcionamiento en el CERN fue construido principalmente para disponer de energía suficiente para producir partículas  $Z$  en grandes cantidades y utilizarlas para someter el modelo estándar a testes experimentales muy rigurosos. Pero, incluso cuando el diseño de un nuevo acelerador está motivado por algún problema específico, los descubrimientos más importantes que lleva a cabo pueden ser bastante inesperados. Éste fue ciertamente el caso del Bevatrón; creó antiprotones, pero su logro más importante consistió en producir una gran variedad de partículas nuevas e inesperadas que interaccionan fuertemente. Del mismo modo, desde el primer momento, se previó que los experimentos en el Supercolisionador podrían llevar a descubrimientos aún más importantes que el mecanismo de la ruptura de la simetría electrodébil.

Los experimentos en aceleradores de alta energía como el Supercolisionador pueden resolver incluso el problema más importante al que se enfrenta la cosmología moderna: el problema

de la materia oscura perdida. Sabemos que la mayoría de la masa de las galaxias, e incluso una fracción mayor de la masa de los cúmulos de galaxias, es oscura: no se encuentra en forma de estrellas luminosas como el Sol. Todavía se requiere más materia oscura en las teorías cosmológicas actuales para dar cuenta del ritmo de expansión del universo. Es posible que esta gran cantidad de materia oscura no esté en forma de átomos ordinarios; si lo estuviera, el gran número de neutrones, protones y electrones afectaría a los cálculos de la abundancia de los elementos ligeros producidos en los primeros minutos de la expansión del universo, de modo que los resultados de dichos cálculos ya no estarían de acuerdo con la observación.

Así pues, ¿qué es la materia oscura? Durante años los físicos han estado especulando sobre partículas exóticas de un tipo u otro que podrían constituir la materia oscura, aunque sin llegar a ninguna conclusión definitiva. Si los experimentos en un acelerador revelan un nuevo tipo de partícula de larga vida media, entonces midiendo su masa y sus interacciones seríamos capaces de calcular cuántas de estas partículas quedaron como residuo del *big bang*, y decidir si ellas constituyen o no toda o parte de la materia oscura del universo.

Recientemente estas cuestiones han sido reavivadas por las observaciones hechas con el satélite Cosmic Background Explorer (COBE). Los sensibles detectores de microondas de este satélite han descubierto indicios de minúsculas diferencias de una parte del cielo a otra en la temperatura de la radiación remanente de una

época en que el universo contaba unos trescientos mil años. Se cree que éstas no uniformidades en la temperatura fueron efecto del campo gravitatorio producido por una distribución ligeramente no uniforme de la materia en aquella época. Este instante, trescientos mil años después del *big bang*, tuvo una importancia crucial en la historia del universo; por primera vez, el universo se hizo transparente a la radiación, y se supone normalmente que las uniformidades en la distribución de materia estaban entonces empezando a colapsar bajo la influencia de su propia gravitación, para formar finalmente las galaxias que hoy vemos en el cielo. Pero las no uniformidades en la distribución de materia que se infieren de las medidas del COBE *no* son galaxias jóvenes; COBE estudió sólo irregularidades de tamaño muy grande, mucho mayor que el tamaño que habría ocupado la materia de las galaxias actuales cuando el universo tenía trescientos mil años. Si extrapolamos lo que ha visto COBE al tamaño mucho más pequeño de las galaxias en formación, y calculamos de este modo el grado de no uniformidad de la materia a estas escalas relativamente pequeñas, entonces llegamos a un problema: las no uniformidades de tamaño galáctico habrían sido demasiado suaves cuando el universo tenía trescientos mil años para haber crecido bajo la influencia de su propia gravitación hasta dar las galaxias actuales. Una salida a este problema es suponer que las no uniformidades de tamaño galáctico habían comenzado ya su condensación gravitatoria durante los primeros trescientos mil años, de modo que la extrapolación de lo que ha visto COBE hasta el tamaño mucho más pequeño de las

galaxias no es válida. Pero esto no es posible si la materia del universo está compuesta fundamentalmente de electrones, protones y neutrones ordinarios, porque las inhomogeneidades en esta materia ordinaria no podrían haber experimentado ningún crecimiento significativo hasta que el universo se hubiera hecho transparente a la radiación; en épocas anteriores cualquier acumulación de materia hubiera sido dispersada por la presión de su propia radiación. Por el contrario, la materia oscura exótica que está compuesta de partículas eléctricamente neutras se habría hecho transparente a la radiación mucho antes, y así habría comenzado su condensación gravitatoria mucho más cerca del principio, produciendo inhomogeneidades a escalas galácticas mucho más fuertes de lo que se infiere de la extrapolación de los resultados del COBE y lo suficientemente fuertes quizá para haber crecido hasta las galaxias actuales<sup>159</sup>. El descubrimiento de una partícula de materia oscura producida en el Supercolisionador daría validez a esta conjetura sobre el origen de las galaxias, e iluminaría así la historia del universo primitivo.

Muchas otras cosas podrían ser descubiertas en aceleradores como el Supercolisionador: partículas en el interior de los quarks que hay en el interior de los protones; cualquiera de las diversas supercompañeras de las partículas conocidas a las que apelan las teorías supersimétricas; nuevos tipos de fuerzas relacionadas con

---

<sup>159</sup> Este comentario se aplica a no uniformidades de tamaño galáctico, pero no a las no uniformidades mucho mayores que se infieren de las medidas del COBE. Éstas son tan grandes que ni siquiera una onda luminosa las habría cruzado durante los primeros 300 000 años después del comienzo de la expansión actual del universo y, por consiguiente (estén o no compuestas de materia oscura), no podrían haber experimentado ningún crecimiento significativo en esta época.

nuevas simetrías internas, y así sucesivamente. No sabemos cuáles de estas cosas existen o no y, caso de que existan, si pueden ser descubiertas en el Supercolisionador. Resultaba por ello tranquilizador que pudiéramos contar por adelantado con al menos un descubrimiento de gran importancia, el mecanismo de la ruptura de la simetría electrodébil, que el Supercolisionador podría llevar a cabo.

Tras la decisión del Departamento de Energía de construir el SSC, siguieron años de planificación y diseño antes de que pudiera empezar la construcción. Una larga experiencia había demostrado que este tipo de trabajo, aunque financiado por el gobierno federal, se realiza mejor por organismos privados, de modo que el Departamento de Energía delegó la gestión de la fase de investigación y desarrollo del Proyecto en la Universities Research Association, un consorcio de sesenta y nueve universidades, sin ánimo de lucro, que había estado gestionando el Fermilab. La asociación reclutó a su vez a científicos de la universidad y de la industria para servir como junta de supervisores del SSC, y nosotros asignamos el trabajo detallado de diseñar el acelerador a un grupo central de diseño en Berkeley encabezado por Maury Tigner, de Cornell. En abril de 1986 el grupo central había concluido su diseño: un túnel subterráneo de 3 metros de anchura formando un gran anillo oval de 85 kilómetros de longitud (comparable al cinturón de circunvalación de Washington), y conteniendo dos finos haces de protones de 20 billones de voltios que viajarían en direcciones opuestas. Los protones estarían



mantenidos en sus trayectorias por 3840 bobinas deflectoras (cada una de ellas de 17 metros de longitud) y focalizados por otras 888 bobinas; todas estas bobinas contendrían un total de 41 500 toneladas de hierro, 19 400 kilómetros de cable superconductor y serían mantenidas a baja temperatura por 2 millones de litros de helio líquido.

El 30 de enero de 1987 el proyecto fue aprobado por la Casa Blanca. En abril, el Departamento de Energía inició el proceso de selección de su emplazamiento solicitando propuestas de los estados interesados. Cuando se cerró el plazo el 2 de septiembre de 1987 se habían recibido 43 propuestas (que en conjunto pesaban unas 3 toneladas) procedentes de estados que querían acoger el SSC. Un comité nombrado por las Academias Nacionales de Ciencia e Ingeniería limitó la elección a siete emplazamientos «mejor cualificados», y luego, el 10 de noviembre de 1988, el secretario de Energía anunció la decisión de su Departamento: el SSC iría a Ellis County, Texas.

La razón de esta elección reside en parte en las profundidades del territorio de Texas. Existe una formación geológica de 80 millones de años que corre al norte desde Austin a Dallas conocida como el Austin Chalk, enterrada como sedimento en un mar que cubrió gran parte de Texas en el período Cretácico. La caliza es impermeable al agua, lo bastante blanda para permitir una fácil excavación, pero lo bastante resistente para que sea innecesario reforzar las paredes del túnel. Apenas podría haberse esperado un material mejor en el que excavar el túnel del Supercolisionador.

Mientras, la lucha por la financiación del SSC estaba empezando. Un momento crucial para un proyecto de este tipo es la primera asignación de crédito para la construcción. Hasta ese momento es sólo cuestión de investigación y desarrollo que puede detenerse tan fácilmente como se puso en marcha. Una vez que la construcción comienza se hace políticamente más difícil detenerla, porque la detención equivaldría a una admisión tácita de que los fondos gastados previamente en la construcción se han derrochado. En febrero de 1988 el presidente Reagan pidió al Congreso 363 millones de dólares destinados a la construcción, pero el Congreso sólo cedió un crédito de 100 millones de dólares, y los calificó específicamente de fondos de investigación y desarrollo, no de construcción.

El proyecto SSC continuó como si su futuro estuviera asegurado. En enero de 1989 fue seleccionado un equipo de gestión industrial, y Roy Schwitters, de Harvard, fue elegido director del SSC. Schwitters es un barbado, pero relativamente joven físico experimental, que entonces tenía 44 años y que había demostrado sus capacidades de gestión como líder de la mayor colaboración experimental en la instalación puntera en alta energía en los Estados Unidos, el Colisionador Tevatrón en Fermilab. El 7 de septiembre de 1989 tuvimos buenas noticias: un comité conjunto Cámara-Senado acordó asignar un crédito de 225 millones de dólares para el SSC durante el año fiscal de 1990, de los que 135 millones de dólares se destinaban a construcción. El proyecto SSC había finalmente superado la fase de investigación y desarrollo del acelerador.

La batalla no había terminado. Todos los años el SSC se presenta de nuevo ante el Congreso en solicitud de fondos, y todos los años se esgrimen los mismos argumentos a favor y en contra<sup>160</sup>. Sólo un físico muy ingenuo se sorprendería de lo poco que tiene que ver este debate con la ruptura de la simetría electrodébil o las leyes finales de la naturaleza. Pero sólo un físico muy cínico dejaría de entristecerse un poco por este hecho. El factor individual más poderoso que mueve a los políticos para apoyar u oponerse al SSC ha sido el interés económico inmediato de sus electores. El fustigador del proyecto en el Congreso, el representante Don Ritter, ha comparado el SSC con los proyectos *pork-barrel*, como se denomina a aquellos proyectos cuya única razón es que

---

<sup>160</sup> Después de que hubiera sido escogido el emplazamiento de Ellis County, entró en el debate un nuevo elemento: la acusación lanzada por políticos descontentos de estados como Arizona, Colorado o Illinois de que Texas había ganado el concurso para el emplazamiento mediante presiones políticas sucias. Fue ampliamente comentado que la elección del emplazamiento de Texas para el SSC por parte del Departamento de Energía fue anunciada precisamente dos días después de la elección de George Bush de Texas para la Presidencia. El secretario de Energía Herrington dijo, después de que fuera anunciada la decisión del emplazamiento del SSC, que el grupo de trabajo del Departamento de Energía que había ordenado los siete emplazamientos «altamente cualificados» estuvo aislado de presiones políticas; que él mismo no recibió su informe hasta el día de la elección; que el grupo de trabajo colocó al emplazamiento de Texas como claramente superior; y que sólo entonces pudo él presentar la decisión final al presidente Reagan y al presidente electo Bush. Puedo creer perfectamente que el proceso podría haber sido acelerado y la decisión anunciada antes de la elección, pero entonces sin duda se le habría acusado de que el anuncio fue dado a tiempo para influir el voto importante de Texas. Por el contrario, incluso si la selección del emplazamiento no se hubiera visto afectada por la elección de George Bush, el Departamento de Energía ciertamente habría tenido conocimiento de la fuerza de la delegación de Texas en el Congreso y su entusiasmo hacia el SSC, y podría haber esperado que una decisión a favor del emplazamiento de Texas mejoraría las oportunidades del SSC para obtener financiación del Congreso. Si así fue, difícilmente podría ser calificado de escándalo, o de ser la primera o la última vez que semejantes cálculos han sido tenidos en cuenta por una agencia gubernamental. En cualquier caso, puedo testificar que ningún cálculo de este tipo jugó un papel en la selección de los siete emplazamientos altamente cualificados por parte del comité de las Academias Nacionales del que formo parte. Nuestro comité consideró desde el principio el emplazamiento de Texas como uno de los competidores mejor situados. Esto se debía en parte a su geología excepcionalmente buena. Otro factor importante fue la oposición local al SSC en algunos de los otros emplazamientos mejor cualificados, incluyendo el de Fermilab en Illinois. En Ellis County casi todo el mundo estaba dispuesto a dar la bienvenida al SSC.

proporcionan ventajas políticas a los congresistas influyentes, motejándolo de proyecto *quark-barrel*<sup>cxiv</sup>. Antes de que fuese elegido el emplazamiento del SSC había un amplio apoyo al proyecto por parte de aquellos que esperaban que fuese localizado en sus propios estados. Cuando testifiqué a favor del SSC ante un comité del Senado en 1987, uno de los senadores me comentó que entonces había casi un centenar de senadores a favor del SSC, pero que después de que fuese anunciado el emplazamiento habría sólo dos. El apoyo ciertamente ha decrecido, pero la estimación del senador resultó demasiado pesimista. Quizá esto se deba a que compañías de todo el país están recibiendo contratos para los componentes del SSC, pero creo que esto también refleja cierta comprensión de la importancia intrínseca del proyecto.

Muchos de los opositores al SSC apuntan a la urgente necesidad de reducir el déficit federal. Éste ha sido el tema recurrente del senador Dale Bumpers de Arkansas, el principal opositor al SSC en el Senado. Puedo entender este interés, pero no comprendo por qué la investigación en las fronteras de la ciencia debe ser el lugar para reducir el déficit. Uno puede pensar en muchos otros proyectos, desde la estación espacial hasta el submarino Sea Wolf, cuyo coste es mucho mayor que el del SSC y cuyo valor intrínseco es mucho menor<sup>161</sup>. ¿Acaso es para proteger los puestos de trabajo por lo que deben continuar estos otros proyectos? Si ésta es la razón, el dinero gastado en el SSC produce los mismos puestos de trabajo con el

---

<sup>161</sup> La estación espacial Freedom ha recibido una asignación de 1946 millones de dólares para el año fiscal 1994, algo menos que los 2122 millones asignados en 1993. Pese a todo, la estación espacial también ha sufrido duros ataques en el Congreso: la Cámara votó a favor por tan sólo un voto de diferencia. (*N. del t.*)

mismo gasto que cualquier otro. Quizá no sea demasiado cínico sugerir que proyectos como la estación espacial y el submarino Sea Wolf están demasiado bien protegidos políticamente por una red de empresas aeroespaciales y de defensa como para ser desmantelados, lo que deja al SSC como un blanco convenientemente vulnerable para un acto de reducción del déficit puramente simbólico.

Uno de los temas recurrentes en el debate sobre el SSC era el argumento de la llamada Gran Ciencia frente a la pequeña ciencia. El SSC se ganó la oposición de algunos científicos que prefieren un estilo de ciencia más antiguo y más modesto: experimentos a cargo de un profesor y un estudiante en los sótanos de un edificio universitario. Muchos de los que trabajan en los laboratorios de los aceleradores gigantes actuales también preferirían una física de ese estilo, pero como resultado de nuestros pasados éxitos nos enfrentamos ahora a problemas que sencillamente no pueden ser abordados con la cuerda y el laque de Rutherford. Imagino que muchos aviadores sienten nostalgia de los días de las cabinas abiertas, pero ésta no es forma de cruzar el Atlántico.

La oposición a los proyectos de «gran ciencia» como el SSC procede también de científicos que preferirían ver el dinero gastado en otras investigaciones (como la suya propia). Pero creo que ellos mismos se están engañando. Cuando el Congreso ha recortado el dinero del presupuesto de la administración solicitado para el SSC, los fondos

liberados han sido asignados a proyectos hidráulicos<sup>162</sup> y no a la ciencia<sup>cxv</sup>. Muchos de estos proyectos hidráulicos son puro *pork*, y cuestan cantidades que dejan pequeños los fondos que iban a ser gastados en el SSC.

El SSC también se ganó la oposición de aquellos que sospechan que la decisión del presidente Reagan de construir el SSC iba ligada a su apoyo al sistema de antimisiles conocido como «guerra de las galaxias» y a la estación espacial; un estúpido entusiasmo por un nuevo gran proyecto tecnológico. Por el contrario, creo que gran parte de la oposición al SSC procede de un igualmente estúpido disgusto por cualquier nuevo gran proyecto tecnológico. Los periodistas acostumbran a meter en el mismo saco al SSC y a la estación espacial como ejemplos horribles de gran ciencia, pese al hecho de que la estación espacial no es un proyecto científico en absoluto. Argumentar sobre gran ciencia frente a pequeña ciencia es una buena forma de evitar la reflexión sobre el valor de los proyectos individuales.

Algún apoyo al SSC políticamente importante procede de aquellos que lo ven como una especie de locomotora industrial que obligue a avances en diversas tecnologías cruciales: criogenia, diseño de bobinas, computación en tiempo real, y así sucesivamente. El SSC también supone un recurso intelectual para ayudar a nuestro país a mantener un cuadro de científicos excepcionalmente dotados. Sin el SSC perderíamos una generación de físicos de altas energías que

---

<sup>162</sup> Téngase en cuenta que el proyecto del SSC está encuadrado en el Departamento de Energía y sus presupuestos se debaten en la comisión de Energía y Recursos Naturales y en la subcomisión de Desarrollo Energético e Hidráulico. (*N. del t.*)

tendrían que hacer su investigación en Europa o en Japón. Incluso aquellos que no se preocupan por los descubrimientos hechos por estos físicos pueden pensar que la comunidad de la física de altas energías representa una reserva de talento científico que ha servido bien a nuestro país, desde el Proyecto Manhattan en el pasado hasta el trabajo actual en la programación paralela para ordenadores.

Éstas son buenas e importantes razones para que el Congreso apoye el SSC, pero no afectan al corazón de los físicos. La urgencia de nuestro deseo de ver terminado el SSC proviene de una sensación de que sin él no seremos capaces de continuar la gran aventura intelectual de descubrir las leyes finales de la naturaleza.

Fui a Ellis County a finales del otoño de 1991 para examinar el emplazamiento del SSC. Como ocurre en gran parte de esta región de Texas, la tierra está ligeramente ondulada y bien regada por muchos arroyuelos flanqueados por hileras de álamos de Virginia. El terreno resultaba poco atractivo en esta época del año; la mayoría de las cosechas habían sido recolectadas, y los campos plantados de trigo de invierno eran aún tan sólo légamo. Sólo en algunos lugares donde la recogida se había retrasado por las lluvias recientes había algunos campos blancos de algodón. El cielo estaba surcado por halcones que esperaban atrapar algún ratón desprevenido. Éste no es un país de vaqueros. Vi un grupo de vacas Black Angus y un caballo blanco solo en un campo, pero los rebaños que llenan los corrales de Fort Worth proceden en su mayoría de ranchos lejanos

al norte y oeste de Ellis County. A medida que uno se acerca hacia el futuro campus del SSC, las buenas carreteras estatales para el tráfico comercial se reducen a caminos condales sin pavimentar, no muy diferentes de los caminos polvorientos que sirvieron a los cultivadores de algodón de este condado hace cien años.

Supe que había llegado al terreno que Texas había comprado para el campus del SSC cuando pasé por granjas valladas que estaban esperando ser trasladadas o demolidas. Aproximadamente a una milla hacia el norte pude ver una enorme estructura de nueva construcción, el Edificio para el Desarrollo de los Electroimanes. Tras un bosquecillo de robles vi una alta torre perforadora, traída desde los campos petrolíferos de la costa del Golfo para perforar unas calas de casi 5 m de anchura para el SSC, profundizando más de 80 m hasta el fondo del Austin Chalk. Tomé un trozo de piedra caliza que había extraído la perforadora y me acordé de Thomas Huxley.

A pesar del edificio y la perforación, yo sabía que la financiación del proyecto todavía podría detenerse. Podía imaginar que las calas fueran rellenadas y el Edificio de los Electroimanes vaciado, y sólo quedarían algunos vagos recuerdos de los granjeros para dar testimonio de que un gran laboratorio científico había sido una vez planeado en Ellis County. Quizá estaba bajo el encanto del optimismo Victoriano de Huxley, pero no podía creer que esto sucediera, ni que en nuestra época la investigación de las leyes finales de la naturaleza fuera abandonada.

Nadie puede decir si un acelerador nos permitirá dar el último paso



hacia una teoría final. Sé que estas máquinas son los continuadores necesarios de una progresión histórica de los grandes instrumentos científicos, que se remontan mucho tiempo antes de los aceleradores actuales de Brookhaven, el CERN, DESY, Fermilab, KEK y SLAC hasta el ciclotrón de Lawrence y el tubo de rayos catódicos de Thomson y, mucho más atrás, hasta el espectroscopio de Fraunhofer y el telescopio de Galileo. Ya sean descubiertas o no durante nuestra vida las leyes finales de la naturaleza, supone algo grande para nosotros continuar la tradición de someter la naturaleza a examen, de preguntar una y otra vez por qué es como es.

## **El fin del Supercolisionador**

El programa del Supercolisionador Superconductor fue cancelado por el Congreso a finales de octubre de 1993. Los especialistas en ciencia política y los historiadores de la ciencia van a estar sin duda muy ocupados en los próximos años analizando esta decisión, pero quizá no sea precipitado ofrecer ahora algunos comentarios sobre cómo y por qué sucedió.

Los problemas del Supercolisionador durante las sesiones parlamentarias de 1993 comenzaron el 24 de junio, cuando la Cámara de Representantes votó a favor de suprimir la financiación para el Supercolisionador del proyecto de ley de presupuestos destinados a desarrollo energético e hidráulico, igual que había sucedido en 1992. Esto no reducía la partida presupuestaria para desarrollo energético e hidráulico, ni aumentaba el apoyo financiero para otras áreas de la ciencia; simplemente, los fondos destinados al Supercolisionador quedaban ahora disponibles para otros proyectos energéticos e hidráulicos. En estas circunstancias, sólo un voto favorable en el Senado podría salvar el Laboratorio.

Una vez más, los físicos de todos los lugares de los Estados Unidos dejaron sus despachos y laboratorios para hacer presión en Washington, durante el verano, a favor del Supercolisionador. El punto culminante de la batalla por la supervivencia del Supercolisionador llegó probablemente con el debate que tuvo lugar en el Senado los días 29 y 30 de septiembre de 1993. Contemplando el debate por televisión, tuve la experiencia surrealista de escuchar

a los senadores en el hemiciclo del Senado discutiendo sobre la existencia de bosones de Higgs, y citando este libro como argumento de autoridad. Finalmente, el 30 de septiembre la votación del Senado arrojó un resultado de 57 votos frente a 42 favorable a conceder al Supercolisionador el importe total (640 millones de dólares) solicitado por la Administración. El comité conjunto Cámara-Senado mantuvo esta decisión, y durante un breve periodo de tiempo pareció que el Supercolisionador se había salvado otra vez. Pero los defensores del Supercolisionador habían subestimado la fuerza de la oposición al proyecto en la Cámara de Representantes. El 19 de octubre, en una maniobra inusual, la Cámara votó, casi en proporción de dos a uno, el rechazo del informe del comité conjunto. El proyecto de ley de presupuestos para desarrollo energético e hidráulico fue devuelto al comité con nuevas instrucciones para dar por concluido el proyecto del Supercolisionador, y esta vez el comité obedeció las instrucciones de la Cámara.

¿Por qué se daba por concluido el Supercolisionador? La verdad es que el programa no encontró obstáculos técnicos. Durante el año transcurrido desde que se escribió este libro se habían excavado 25 kilómetros del túnel principal a través del Austin Chalk, en el subsuelo de Ellis County, Texas. Se había completado el alojamiento y se había instalado parte del equipo técnico del acelerador lineal, el primero de una serie de aceleradores diseñados para poner en marcha los protones en su camino hacia el Supercolisionador. Se había concluido el trabajo del túnel de 570 metros del Lanzador de

Baja Energía, que debería acelerar hasta 12 000 millones de electrónvoltios los protones emergentes del acelerador lineal antes de pasarlos al Lanzador de Energía Media. (Esto es baja energía para los niveles actuales, pero cuando yo comencé a investigar en física 12 000 millones de voltios hubieran estado mucho más allá de la capacidad de cualquier laboratorio del mundo). Se habían establecido factorías en Louisiana, Texas y Virginia para la producción en masa de las bobinas magnéticas que deberían guiar y focalizar los protones en su camino a través de los tres lanzadores y el anillo principal de 85 kilómetros. Al Laboratorio para el Desarrollo de las Bobinas Magnéticas, que yo visité en 1991, se habían unido en el mismo lugar otros edificios: un Laboratorio para la Comprobación de las Bobinas Magnéticas, un Edificio para la Comprobación de los Sistemas Aceleradores, y un edificio para alojar los enormes refrigeradores y compresores destinados a obtener el helio líquido necesario para enfriar las bobinas superconductoras del anillo principal. Se había aprobado provisionalmente un programa experimental, en el que iban a colaborar más de 1000 doctores en física procedentes de 24 países diferentes, y otro programa estaba a punto de ser aprobado.

Tampoco se había producido ningún descubrimiento en física de partículas elementales que hubiera debilitado las razones fundamentales a favor del Supercolisionador. Seguimos bloqueados en nuestros esfuerzos para ir más allá del modelo estándar. Sin el Supercolisionador, nuestra mejor esperanza es que los físicos en Europa prosigan con sus planes para el LHC.

Los problemas del proyecto del Supercolisionador han sido en parte un efecto colateral de cambios políticos ajenos a él. El presidente Clinton ha mantenido el apoyo de la administración al Supercolisionador, pero él se jugaba menos políticamente en ello que lo que se habían jugado el presidente Bush de Texas o el presidente Reagan, durante cuya administración se inició el proyecto. Lo que es quizá más importante, muchos miembros del Congreso (especialmente los nuevos) sienten ahora que es necesario demostrar su prudencia fiscal votando contra *algo*. El Supercolisionador representa un 0,043 por 100 del presupuesto federal, pero se ha convertido en un símbolo político conveniente.

La nota más recurrente en el debate sobre el Supercolisionador fue un interés manifiesto en las prioridades. Éste es un punto importante; viendo algunos de nuestros ciudadanos mal alimentados y mal alojados, nunca resulta fácil gastar dinero en otras cosas. Pero algunos miembros del Congreso reconocen que lo que nuestra sociedad gana a largo plazo con el apoyo a la ciencia básica supera con mucho cualquier beneficio inmediato que pudiera obtenerse con estos fondos. Por otro lado, muchos miembros del Congreso que se cuestionaban vigorosamente la prioridad de un gasto regular en el Supercolisionador votaron a favor de otros proyectos que son mucho menos interesantes. Otros proyectos mayores, como la estación espacial, han sobrevivido este año, menos debido a su valor intrínseco que al hecho de que muchos electores de los miembros del Congreso tienen un interés económico en dichos programas. Quizá si el Supercolisionador hubiera costado

el doble, y hubiera creado el doble de puestos de trabajo, las cosas le hubieran ido mucho mejor.

Los opositores al Supercolisionador también hicieron muchas acusaciones de mala gestión y costes disparados. De hecho, no hubo mala gestión en el Supercolisionador y casi todos los incrementos de costes se han debido a los retrasos en la financiación por parte del gobierno. Dije esto mismo cuando testifiqué ante el Comité de Energía y Recursos Naturales del Senado en agosto de 1993. La mejor respuesta a estas acusaciones fue la afirmación que hizo en agosto la secretaria de Energía, O'Leary, según la que, una vez gastada la cantidad total asignada, el Supercolisionador está completo en un 20 por 100.

Algunos miembros del Congreso han argumentado que, aunque el Supercolisionador es científicamente valioso, no podemos permitirnoslo precisamente en este momento. Pero cuando empezamos un proyecto de esta envergadura es casi seguro que, durante los años necesarios para llevarlo a cabo, habrá algunos periodos en los que la economía vaya mal. ¿Qué deberíamos hacer: seguir empezando grandes proyectos simplemente para darlos por concluidos cuando haya una recesión económica? Ahora que estamos dando por perdidos los 2000 millones de dólares y los 10 000 hombres-año invertidos ya en el Supercolisionador, ¿qué científicos o gobiernos extranjeros querrían participar en un proyecto semejante en el futuro, que pudiera ser cancelado en el momento en que la economía volviese a ir mal? Es cierto que cualquier programa debería ser reconsiderado si lo aconsejan así los

cambios en ciencia o tecnología. De hecho, fueron los físicos de altas energías los que tomaron la iniciativa de cancelar ISABELLE, el último gran proyecto de acelerador, cuando los cambios en los objetivos de la física lo hicieron conveniente. Pero no se ha producido ningún cambio en las razones para construir el Supercolisionador. Con la cancelación del programa del Supercolisionador, después de todo el trabajo invertido, por la razón de que el presupuesto de este año es reducido, los Estados Unidos parecen estar diciendo adiós para siempre a cualquier esperanza de tener alguna vez un programa responsable de investigación en física de partículas elementales.

Reflexionando sobre la batalla de este verano, encuentro algún consuelo en la observación de que existen miembros del Congreso quienes, aparte de los motivos políticos o económicos que puedan tener para apoyar el Supercolisionador, están realmente interesados en el contenido de la ciencia que podría realizar. Uno de ellos es el senador Bennett Johnston, de Louisiana, que organizó el bando favorable al Supercolisionador en el debate del Senado. Su estado tenía un importante interés económico en la construcción de las bobinas magnéticas del Supercolisionador, pero, por encima de esto, él es un entusiasta de la ciencia. Su interés por la ciencia quedó de manifiesto en un elocuente discurso en el hemiciclo del Senado. La misma excitación intelectual hacia la ciencia puede encontrarse en las afirmaciones que hicieron otros miembros del Congreso, tales como los senadores Moynihan de Nueva York y Kerrey de Nebraska y los congresistas Gephardt de Missouri y

Nadler de Manhattan, así como el consejero científico del presidente, Jack Gibbons. En mayo, formé parte de un grupo de físicos que se reunió con los nuevos miembros del Congreso. Después de que otros hubieran explicado la valiosa experiencia tecnológica que se ganaría con la construcción del Supercolisionador, comenté que, aunque no sabía mucho de política, pensaba que uno no debería olvidar que existen muchos votantes que están sinceramente interesados en los problemas fundamentales de la ciencia, además de sus posibles aplicaciones a la tecnología. Un congresista de California comentó entonces que él estaba de acuerdo conmigo sólo en una cosa: que yo no sabía mucho de política. Poco después, entró en la sala un congresista de Maryland y, después de escuchar durante algún tiempo las discusiones sobre los retornos tecnológicos, comentó que uno no debería olvidar que muchos votantes están interesados también en los problemas fundamentales de la ciencia. Salí contento.

El debate sobre el Supercolisionador también inspira reflexiones menos optimistas. Durante siglos, las relaciones entre ciencia y sociedad han estado gobernadas por un pacto tácito. Generalmente los científicos quieren hacer descubrimientos que sean universales o bellos o fundamentales, ya puedan preverse o no beneficios concretos para la sociedad. Algunas personas que no son científicos encuentran excitante este tipo de ciencia pura, pero la sociedad, al igual que el congresista de California, ha estado generalmente dispuesta a apoyar el trabajo en ciencia pura principalmente porque espera que tenga aplicaciones ya sea a la tecnología o la medicina o



la guerra. Generalmente estas expectativas se han mostrado correctas. No es simplemente que *cualquier* trabajo en ciencia pueda llegar ocasionalmente a algo útil. Lo que sucede, más bien, es que al hacer retroceder las fronteras del conocimiento es cuando esperamos encontrar cosas que son realmente nuevas, y que pueden ser útiles de la misma forma que las ondas de radio, los electrones y la radiactividad resultaron ser útiles. Y el esfuerzo para hacer estos descubrimientos también nos obliga a una especie de virtuosismo tecnológico e intelectual que conduce a otras aplicaciones.

Pero ahora este pacto parece estar en entredicho. No se trata solamente de que algunos miembros del Congreso hayan perdido su confianza en la ciencia pura; la batalla por los fondos ha llevado a algunos de los propios científicos, que trabajan en campos aplicados, a volverse contra el apoyo a aquellos de nosotros que buscamos las leyes de la naturaleza. Y los problemas a los que se ha enfrentado el Supercolisionador en el Congreso son simplemente un síntoma de este desencanto de la ciencia pura. Otro síntoma lo constituye un intento reciente en el Senado para exigir que la National Science Foundation dedique el 60 por 100 de sus gastos a la ciencia orientada a las necesidades sociales. No digo que el dinero no deba ser bien gastado, pero es lamentable que algunos senadores escojan la investigación en ciencia pura como el lugar del que deben sustraerse estos fondos. El debate sobre el Supercolisionador ha planteado cuestiones cuya importancia va más allá del propio Supercolisionador, y que nos acompañarán durante décadas.

Austin, Texas

Octubre de 1993

## Notas bibliográficas

---

- <sup>i</sup> E. Zilsel, «The Genesis of the Concept of Physical Law», *Philosophical Review*, 51 (1942), p. 245.
- <sup>ii</sup> Peter S. Green, *Alexander to Actium: The Historical Evolution of the Hellenistic Age*, University of California Press, Berkeley y Los Ángeles, 1990, pp. 456, 475-478.
- <sup>iii</sup> *The Autobiography of Robert A. Millikan*, Prentice-Hall, Nueva York, 1950, p. 23. Véase también una nota de K. K. Darrow, *Isis*, 41 (1950), p. 201.
- <sup>iv</sup> La evidencia de una sensación de complacencia en la ciencia de finales del siglo XIX ha sido recogida por el historiador de Berkeley Lawrence Badash, en «The Completeness of Nineteenth-Century Science», *Isis*, 63 (1972), pp. 48-58.
- <sup>v</sup> A. A. Michelson, *Light Waves and Their Uses*, University of Chicago Press, Chicago, 1903, p. 163.
- <sup>vi</sup> P. A. M. Dirac, «Quantum Mechanics of Many Electron Systems», *Proceedings of the Royal Society*, A123 (1929), p. 713.
- <sup>vii</sup> Citado por S. Boxer en el *New York Times Book Review* (26 de enero de 1992), p. 3.
- <sup>viii</sup> Thomas Henry Huxley, *On a Piece of Chalk*, ed. Loren Eisley, Scribner, Nueva York, 1967.
- <sup>ix</sup> D. J. Gross, «The Status and Future Prospects of String Theory», *Nuclear Physics B* (Proceedings Supplement), 15 (1990), p. 43.
- <sup>x</sup> E. Nagel, *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Harcourt, Brace, Nueva York, 1961 [hay trad. cast.: *La estructura de la ciencia. Problemas de la lógica de la investigación científica*, Paidós, Buenos Aires; 2.<sup>a</sup> reimp., Barcelona, 1989].
- <sup>xi</sup> H. F. Shaefer III, «Methylene: A Paradigm for Computational Quantum Chemistry», *Science*, 231 (1986), p. 1100.
- <sup>xii</sup> S. J. Gould, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*, Norton, Nueva York, 1989 [hay trad. cast.: *La vida maravillosa: Burgess Shale y la naturaleza de la historia*, Crítica, Barcelona, 1991].
- <sup>xiii</sup> P. Anderson, *Science*, 177 (1972), p. 393.
- <sup>xiv</sup> E. Nagel, *The Structure of Science*, pp. 338-345.
- <sup>xv</sup> La historia de esta batalla ha sido narrada por el historiador Stephen Brush en *The Kind of Motion We Call Heat*, North-Holland, Amsterdam. 1976, especialmente en la sección 1.9 del libro 1.
- <sup>xvi</sup> R. Hoffman, «Under the Surface of the Chemical Article», *Angewandte Chemie*, 27 (1966), pp. 1597-1602.
- <sup>xvii</sup> H. Primas, *Chemistry, Quantum Mechanics, and Reductionism*, Springer-Verlag, Berlín, 1983.
- <sup>xviii</sup> L. Pauling, «Quantum Theory and Chemistry», en *Max Planck Festschrift*, eds. B. Kockel. W. Mocke y A. Papapetrou, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlín. 1959, pp. 385-388.
- <sup>xix</sup> A. B. Pippard, «The Invincible Ignorance of Science» (Eddington Memorial Lecture dada en Cambridge, 28 de enero de 1988), *Contemporary Physics*, 29 (1988), p. 393.
- <sup>xx</sup> G. Ryle, *The Concept of Mind*, Hutchinson. Londres, 1949. [Hay trad. cast.: *El concepto de lo mental*. Paidós. Buenos Aires, 1967].
- <sup>xxi</sup> G. Gissing, *The Place of Realism in Fiction*, reeditada en *Selections Autobiographical and Imaginative from the Works of George Gissing*, Jonathan Cape y Harrison Smith, Londres, 1929, p. 217.
- <sup>xxii</sup> B. Moyers, *A World of Ideas*, ed. B. S. Flowers, Doubleday, Nueva York, 1989, pp. 249-262.
- <sup>xxiii</sup> P. Anderson, «On the Nature of Physical Law», *Physics Today* (diciembre de 1990), p. 9.

- 
- xxxiv R. G. Jahn, carta al editor, *Physics Today* (octubre de 1991), p. 13.
- xxxv *Science* (9 de agosto de 1991), p. 611.
- xxxvi Fyodor Dostoyevski, *Notes from Underground*, trad. Mirra Ginsburg, Bantam Books, Nueva York, 1974, p. 13 [hay trad. cast.: *Memorias del subsuelo*, Barral, Barcelona, 1978].
- xxxvii E. Mayr. «How Biology Differs from the Physical Sciences», en *Evolution at a Crossroads*, eds. D. Depew y B. B. Weber, MIT Press, Cambridge, Mass., 1985, p. 44.
- xxxviii S. Weinberg. «Unified Theories of Elementary Particle Interactions», *Scientific American*, 231 (julio de 1974), p. 50.
- xxxix S. Weinberg, «Newtonianism».
- xxx Sobre este debate, véase E. Mayr, «The Limits of Reductionism», y mi respuesta, en *Nature*, 331 (1987), p. 475.
- xxxi R. L. Park, *The Scientist* (15 de junio de 1987) (adaptado de una charla en el Symposium «Big Science/Little Science» en la reunión anual de la American Physical Society, 20 de mayo de 1987).
- xxxii P. W. Anderson, carta al *New York Times*, 8 de junio de 1986.
- xxxiii H. Rubin, «Molecular Biology Running into a Cul-de-sac?», carta a *Nature*, 335 (1988), p. 121.
- xxxiv E. Mayr, *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1982, p. 62.
- xxxv A. M. Weinberg, «Criteria for Scientific Choice», *Physics Today* (marzo de 1964), pp. 42-48. Véanse también A. M. Weinberg, «Criteria for Scientific Choice». *Minerva*, 1 (invierno de 1963), pp. 159-171; y «Criteria for Scientific Choice II: The Two Cultures», *Minerva*, 3 (otoño de 1964), pp. 3-14.
- xxxvi S. Weinberg, «Newtonianism».
- xxxvii J. Gleick, *Chaos: Making a New Science*, Viking, Nueva York, 1987 [hay trad. cast.: *Caos. La creación de una ciencia*, Seix Barral, Barcelona, 1988].
- xxxviii Discurso de clausura a cargo de James Gleick en la Conferencia Nobel de 1990 en el Gustavus Adolphus College, octubre de 1990.
- xxxix N. Bohr, *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici*, Como, Setiembre 1927, *reeditado en Nature*, 121 (1928), pp. 78 y 580.
- xl F. Capra, *The Tao of Physics*, Shambhala, Boston, 1991 [hay trad. cast.: *El Tao de la física*, Cárcamo, Barcelona, 1987].
- xli He aquí una lista parcial de referencias: J. B. Hartle, «Quantum Mechanics of Individual Systems», *American Journal of Physics* (1968), p. 704; B. S. De Witt y N. Graham, en *The Many-Worlds Interpretations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, 1973, pp. 183-186; D. Deutsch, «Probability in Physics», Oxford University Mathematical Institute, borrador, 1989; Y. Aharonov, artículo en preparación.
- xlii La información citada aquí sobre los informes y nominaciones al Premio Nobel está tomada de la excelente biografía científica de Einstein escrita por A. Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Nueva York, 1982, cap. 30 [hay trad. cast.: *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Ariel, Barcelona, 1984].
- xliii Para una discusión y referencias, véase D. G. Mayo, «Novel Evidence and Severe Tests», *Philosophy of Science*, 58 (1991), p. 523.
- xliv Hice este comentario en mis conferencias Bampton en la Universidad de Columbia en 1984. Posteriormente tuve el gusto de ver que la misma conclusión fue alcanzada independientemente por un acreditado historiador de la ciencia, Stephen Brush, en «Prediction and Theory Evaluation: The Case of Light Bending», *Science*, 246 (1989) p. 1124.
- xlv Especialmente en la obra de Irwin Shapiro, entonces en el MIT.
- xlvi La historia de estos desarrollos ha sido narrada por T. Y. Cao y S. S. Schweber, «The Conceptual Foundation and Philosophical Aspects of Renormalization Theory», *Synthese*, vol. 97-1, octubre de 1993, pp. 33-108.
- xlvii De «Aus dem Nachlass der Achtzigerjahre», en un cuaderno de los años ochenta publicado póstumamente en F. Nietzsche, *Werke III*, ed. Schlecta, Carl Hauser, Munich, 1969, p. 603.

---

Este comentario es el tema de una novela, *Death of a Beekeeper*, New Directions, Nueva York, 1981, escrita por mi colega de Texas Lars Gustafsson

<sup>xlviii</sup> Estos resultados teóricos y experimentales son revisados por T. Kinoshita, en *Quantum Electrodynamics*, ed. T. Kinoshita, World Scientific, Singapur, 1990.

<sup>xlix</sup> Eugene Garfield, «The Most-Cited Papers of All Time, SCI 1945-1988», en *Current Contents* (12 de febrero de 1990), p. 3. Para ser más preciso, éste era el único artículo sobre física de partículas elementales (o sobre cualquier otro aspecto de la física con excepción de la biofísica, química física y cristalografía) entre el centenar de artículos más frecuentemente citados en todas las ciencias durante el periodo cubierto por el examen del ISI, de 1945 a 1988. (Presumiblemente debido a la guerra, no hay artículos frecuentemente citados sobre física de partículas elementales escritos entre 1938 y 1945).

<sup>i</sup> El astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar ha escrito conmovedoramente acerca del papel de la belleza en la ciencia, en *Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations in Science*, University of Chicago Press, Chicago, 1987, y *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*, 43, n.º 3 (diciembre de 1989), p. 14.

<sup>ii</sup> Citado por G. Holton, «Constructing a Theory: Einstein's Model», *American Scholar*, 48 (verano de 1979), p. 323 [hay trad. cast.: «La construcción de una teoría: El modelo de Einstein», en G. Holton, *Ensayos sobre el pensamiento científico en la época de Einstein*, Alianza Editorial, Madrid, 1982, pp. 323-359].

<sup>iii</sup> E. P. Wigner, «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics», *Communications in Pure and Applied Mathematics*, 13 (1960), pp. 1-14.

<sup>iiii</sup> J. L. Richards, «Rigor and Clarity: Foundations of Mathematics in France and England, 1800-1840», *Science in Context*, 4 (1991), p. 297.

<sup>liv</sup> F. Crick. *What Mad Pursuit: A Personal View of Scientific Discovery*, Basic Books, Nueva York, 1988 [hay trad. cast.: *Qué loco propósito*, Tusquets, Barcelona, 1989].

<sup>lv</sup> En una carta de Kepler a Fabricius de mayo de 1605, citada por E. Zilsel, «The Genesis of the concept of Physical Law», *Philosophical Review*, 51 (1942), p. 245.

<sup>lvi</sup> G. Gale, «Science and the Philosophers», *Nature*, 312 (1984), p. 491.

<sup>lvii</sup> L. Wittgenstein, *Culture and Value*, Blackwell, Oxford, 1980.

<sup>lviii</sup> A modo de ejemplos, véase alguno de los artículos en *Reduction in Science: Structure, Examples, Philosophical Problems*, eds. W. Balzer, D. A. Pearce y H.-J. Schmidt, Reidel, Dordrecht, 1984.

<sup>lix</sup> P. K. Feyerabend, «Explanation, Reduction, and Empiricism», *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, 3 (1962), pp. 46-48. Los filósofos a los que se refiere Feyerabend son los positivistas del Círculo de Viena, sobre los que volveré más adelante.

<sup>lx</sup> A. Rupert Hall, «Making Sense of the Universe», *Nature*, 327 (1987), p. 669.

<sup>lxi</sup> R. McCormach, *Night Thoughts of a Classical Physicist*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1982.

<sup>lxii</sup> Citado por J. Berstein, «Ernst Mach and the Quarks», *American Scholar*, 53 (invierno de 1983-1984), p. 12.

<sup>lxiii</sup> Esta traducción está tomada de *Sources of Quantum Mechanics*, ed. B. L. van der Waerden, Dover, Nueva York, 1967.

<sup>lxiv</sup> G. Gale, «Science and the Philosophers».

<sup>lxv</sup> E. Mach, *Physikalische Zeitschrift*, 11 (1910), p. 603; trad. ing.: J. Blackmore, *British Journal of the Philosophy of Science*, 40 (1989), p. 524. Existe un debate entre los historiadores de la ciencia, revisado por Blackmore, acerca de si Mach se reconcilió filosóficamente con la teoría de la relatividad especial de Einstein, que había sido influenciada por las propias doctrinas de Mach.

<sup>lxvi</sup> Este punto ha sido planteado contundentemente por el filósofo Dudley Shapere, «The Concept of Observation in Science and Philosophy», *Philosophy of Science*, 49 (1982), pp. 485-525.

- lxvii W. Heisenberg, en *Encounters with Einstein, and Other Essays on People, Places and Particles*, Princeton University Press, Princeton, N. J., 1983, p. 114 [hay trad. cast.: *Encuentros y conversaciones con Einstein*, Alianza Editorial, Madrid, 1985].
- lxviii J. Bernstein, «Ernst Mach».
- lxix Para una etiología y crítica de los relativistas, véase M. Bunge, «A critical Examination of the New Sociology of Science», *Philosophy of the Social Sciences*, 21 (1991), p. 524 [Parte 1], e *ibid.*, 22 (1991), p. 46 [Parte 2].
- lxx T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago, 1970, 2.<sup>a</sup> ed. ampliada [hay trad. cast.: *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, México, 1990].
- lxxi S. Traweek, *Beamtimes and Lifetimes: The World of High Energy Physicists*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1988.
- lxxii D. E. Chubin y E. J. Hackett, *Peerless Science: Peer Review and U.S. Science Policy*, State University of New York Press, Albany, N.Y., 1990; citado en una reseña de libros por Sam Treiman, *Physics Today* (octubre de 1991), p. 115.
- lxxiii B. Latour y S. Woolgar, *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts*, Sage Publications, Beverly Hills, Calif., y Londres, 1979, p. 237.
- lxxiv A. Pickering, *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*, University of Chicago Press, Chicago, 1984.
- lxxv P. Feyerabend, «Explanation, Reduction, and Empiricism».
- lxxvi S. Harding, *The Science Question in Feminism*, Cornell University Press, Ithaca, N.Y., 1986, p. 9.
- lxxvii *Ibid.*, p. 250.
- lxxviii T. Roszak, *Where the Wasteland Ends*, Doubleday, Anchor Books, Garden City, N.Y., 1973, p. 375.
- lxxix Esto es reconocido por Evelyn Fox Keller, en *Reflections on Gender and Science*, Yale University Press, New Haven, 1985. (Como ejemplo de la actitud de los científicos, Keller cita un viejo comentario mío: «Las leyes de la naturaleza son tan impersonales y están tan libres de valores humanos como las reglas de la aritmética. Nosotros no queríamos que fuesen así, pero lo son»). Más recientemente, respondiendo a la reinterpretación sociológica rigurosa del progreso científico, el genetista de la Universidad de Londres J. S. Jones comentaba que «la sociología de la ciencia mantiene la misma relación con la investigación que la pornografía con el sexo: es más barata, más fácil y, en tanto que está limitada sólo por la imaginación, puede ser mucho más divertida» [en una reseña de *The Mendelian Revolution: The Emergence of Hereditarian Concepts in Modern Science and Society*, por Peter J. Bowler, *Nature*, 342 (1989), p. 352].
- lxxx Editorial en *Nature*, 356 (1922), p. 729. El ministro en cuestión es George Walden, M.P.
- lxxxi B. Appleyard, *Understanding the Present*, Picador, Londres, 1992.
- lxxxii G. Holton, «How to Think About the End of Science», en *The End of Science*, ed. R. Q. Elvee, University Press of America, Lanham, Minn., 1992.
- lxxxiii Citado por John Horgan en *Scientific American* (noviembre de 1991), p. 48.
- lxxxiv El término «principio antrópico» se debe a Brandon Carter; véase *Confrontation of Cosmological Theories with Observation*, ed. M. S. Longair, Reidel, Dordrecht, 1974. Véase también B. Carter, «The Anthropic Principle and Its Implications for Biological Evolution», en *The Constants of Physics*, eds. W. McCrea y M. J. Rees, Royal Society, Londres, 1983, p. 137; reeditado en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A310 (1983), p. 347. Para una exposición minuciosa de las distintas versiones del principio antrópico, véanse J. D. Barrow y F. J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Clarendon Press, Oxford, 1986; J. Gribbin y M. Rees, *Cosmic Coincidences: Dark Matter, Mankind, and Anthropic Cosmology*, Bantam Books, Nueva York, 1989, cap. 10 [hay trad. cast.: *Coincidencias cósmicas*, Pirámide, Madrid, 1991]; J. Leslie, *Universes*, Routledge, Londres, 1989.
- lxxxv F. Hoyle, *Galaxies, Nuclei, and Quasars*, Heinemann, Londres, 1965.

- 
- lxxxvi Una presentación no matemática la da L. Abbott, *Scientific American*, 258 n.º 5 (1985) p. 106.
- lxxxvii K. R. Popper, *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach*, Clarendon Press, Oxford, 1972, p. 195 [hay trad. cast.: *Conocimiento objetivo: un enfoque evolucionista*, Tecnos, Madrid, 1972].
- lxxxviii M. Redhead, «Explanation», agosto de 1989, pendiente de publicación.
- lxxxix Una discusión interesante de esta posibilidad ha sido dada por Paul Davies, «What Are the Laws of Nature», en *The Reality Club #2*, ed. John Brockman, Lynx Communications, Nueva York, 1988.
- xc Véanse, por ejemplo, J. A. Wheeler, «On Recognizing “Law Without Law”» (*Oersted Lecture* presentada en la Joint Ceremonial Session de la American Association of Physics Teachers y la American Physical Society, 25 de enero de 1983), *American Journal of Physics*, 51 (1983), p. 398. J. A. Wheeler, «Beyond the Black Hole», en *Some Strangeness in the Proportion: A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein*, ed. H. Woolf, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1980, p. 341.
- xcí H. B. Nielsen, «Field Theories Without Fundamental Gauge Symmetries», en *The Constants of Physics*, eds. W. McCrea y M. J. Rees, Royal Society, Londres, 1983, p. 51; reeditado en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A310 (1983), p. 261.
- xcii E. P. Wigner, «The Limits of Science», *Proceedings of the American Philosophical Society*, 94 (1950), p. 422.
- xciii M. Redhead, «Explanation».
- xciv R. Nozick, *Philosophical Explanation*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1981, cap. 2.
- xcv Salmos 19:1
- xcvi S. Hawking, *A Brief History of Time*, Bantam Books, Londres, 1988 [hay trad. cast.: *Historia del tiempo*, Crítica, Barcelona, 1988]; también he visto títulos de dos libros recientes que utilizan la misma expresión: J. Trefil, *Reading the Mind of God*, Scribner, Nueva York, 1989, y P. Davies, *The Mind of God: The Scientific Basis for a Rational World*, Simon & Schuster, Nueva York, 1992.
- xcvii C. W. Misner, en *Cosmology, History, and Theology*, eds. W. Yourgau y A. D. Breck, Plenum Press, Nueva York, 1977, p. 97.
- xcviii Einstein, citado por Gerald Holton en *The Advancement of Science, and Its Burdens*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986, p. 91.
- xcix A. Einstein, contribución a *Festschrift für Aunel Stadola*, Orell Füssli Verlag, Zurich, 1929, p. 126.
- c P. Tillich, en una charla en la Universidad de Carolina del Norte, c. 1960, citada por B. De Witt, «Decoherence Without Complexity and Without an Arrow of Time», versión provisional, Universidad of Texas Center of Relativity, 1992.
- ci Entrevista en el *New York Times*, 25 de abril de 1929. Agradezco esta cita a A. Pais.
- cii M. F. Perutz, «Erwin Schrödinger *What Is Life?* and Molecular Biology», en *Schrödinger: Centenary Celebration of a Polymath*, ed. C. W. Kilmeister, Cambridge University Press, Cambridge, 1987, p. 234.
- ciii Supe por primera vez del profesor Johnson cuando un amigo me mostró su artículo, «Evolution as Dogma», en *First Things: A Monthly Journal of Religion and Public Life* (octubre de 1990), pp. 15-22. Él también publicó recientemente un libro, *Darwin on Trial*, Regnery Gateway, Washington, D.C., 1991, y según un relato en *Science*, 253 (1991), p. 379, ahora está ocupado en un ciclo de conferencias para hacer públicas sus opiniones y escritos.
- civ S. Gould, «Impeaching a Self-Appointed Judge», *Scientific American* (julio de 1992), p. 118.
- cv J. Polkinghorne, *Reason and Reality: The Relation Between Science and Theology*, Trinity Press International, Filadelfia, 1991.
- cvi Para dos comentarios recientes, véanse S. Levinson, «Religious Language and the Public Square», *Harvard Law Review*, 105 (1992), p. 2061; M. Midgley, *Science as Salvation: A Modern Myth and Its Meaning*, Routledge, Londres, 1992.

---

<sup>cvii</sup> A. Lightman y R. Brawer, *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1990.

<sup>cviii</sup> S. Sontang, «Piety Without Content», en *Against Interpretation and Other Essays*, Dell, Nueva York, 1961 [hay trad. cast.: *Contra la interpretación*, Seix Barral, Barcelona, 1984].

<sup>cix</sup> H. R. Trevor-Roper, *The European Witch-Craze of the Sixteenth and Seventeenth Centuries, and Other Essays*, Harper & Row, Nueva York, 1969.

<sup>cx</sup> K. R. Popper, *The Open Society and Its Enemies* [1945], Princeton University Press, Princeton, N.J., 1966, p. 244 [hay trad. cast.: *La sociedad abierta y sus enemigos*, Paidós, Buenos Aires, 1957].

<sup>cxii</sup> Véase su *Treatise on Human Nature* (1739) [hay trad. cast.: *Tratado de la naturaleza humana*, Editora Nacional, Madrid, 1977].

<sup>cxiii</sup> Bede, *A History of the English Church and People*, trad. Leo Sherley-Price y rev. R. E. Latham, Dorset Press, Nueva York, 1985, p. 127.

<sup>cxiiii</sup> Citado en *Science*, 221 (1983), p. 1040.

<sup>cxv</sup> D. Ritter, *Perspectives*, verano de 1988, p. 33.

<sup>cxvi</sup> Véase, por ejemplo, R. Darman, citado por P. Aldhous en «Space Station Back on Track», *Nature*, 351 (1991), p. 507.