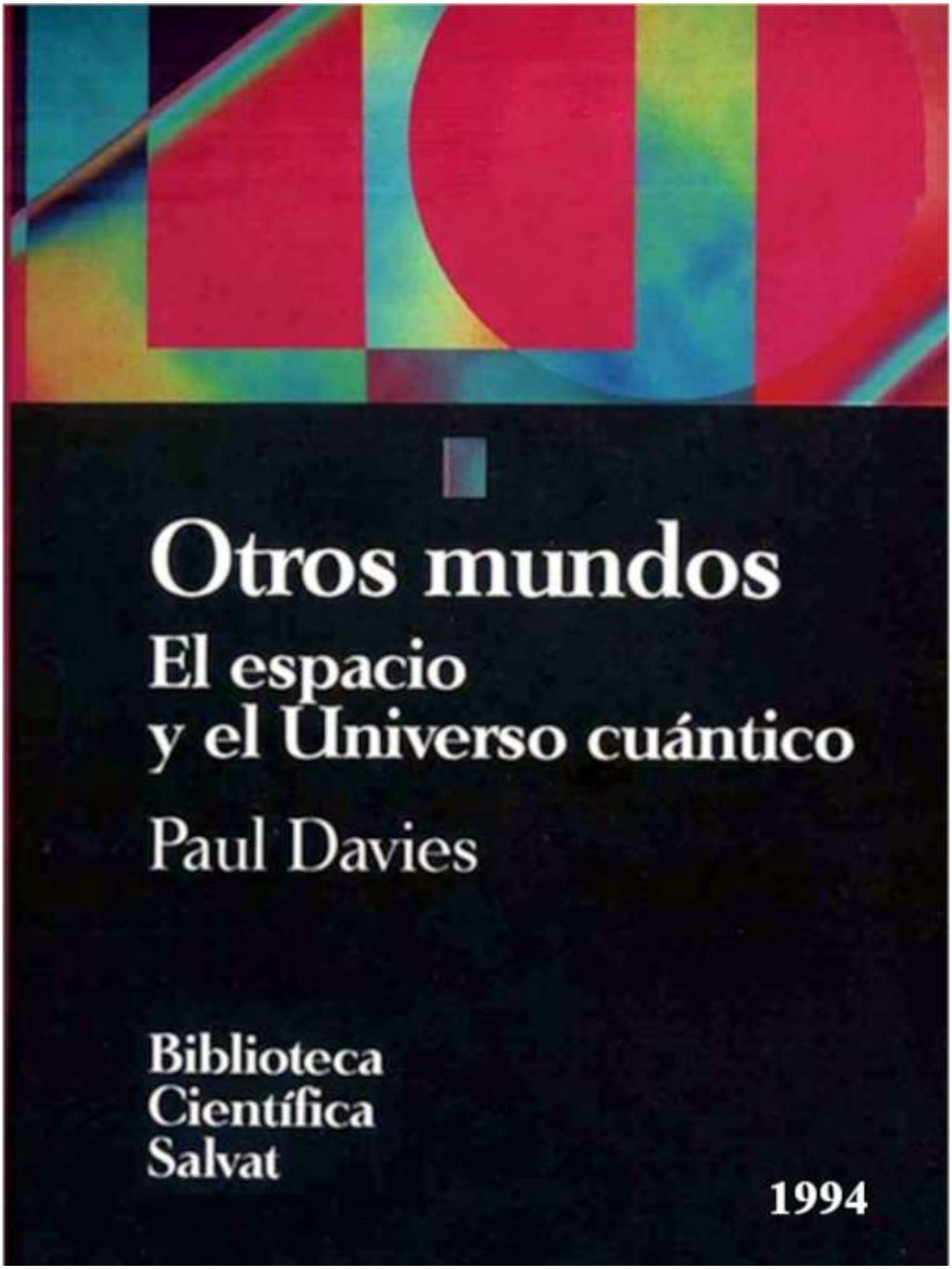
Otros mundos
El espacio
y el Universo cuántico
Paul Davies
Biblioteca
Científica
Salvat
1994

Reseña

¿Es el Universo un accidente aleatorio o es el resultado de un cuidadoso proceso de selección? ¿Cuál es la naturaleza de la realidad?...en definitiva, ¿Qué es el hombre?

En este libro el autor afronta el impacto de la teoría cuántica básica sobre nuestra concepción del Universo. Esta teoría nos ha demostrado que el mundo es un juego de azar...y nosotros formamos parte de los jugadores.

Paul Davies pone en entredicho los conceptos clásicos sobre la naturaleza del tiempo y del espacio y presenta una visión absolutamente distinta del Universo en el que caben múltiples mundos en un superespacio de existencias alternativas.

El lector no necesita tener ningún conocimiento científico ni filosófico puesto que el autor utiliza un lenguaje elemental.

"El profesor Davies describe los aspectos más profundos de la teoría cuántica de una forma clara y luminosa, a la vez que extremadamente estimulante. Nadie podrá leer este libro sin sentir la emoción de estar llegando a lo más profundo y paradójico del Universo."

Isaac Asimov

Índice

Prefacio

Prólogo

I. Dios no juega a los dados

II. Las cosas no siempre son lo que parecen

III. El caos subatómico

IV. Los extraños mundos de los cuantos

V. Superespacio

VI. La naturaleza de la realidad

VII. Mente, materia y mundos múltiples

VIII. El principio antrópico

IX. ¿Es el universo un accidente?

X. El supertiempo

El autor

Prefacio

Aunque la palabra cuanto ha pasado a formar parte del vocabulario popular, pocas personas se dan cuenta de la revolución que ha ocurrido en la ciencia y en la filosofía desde los inicios de la teoría cuántica de la materia a comienzos del siglo. El pasmoso éxito de esta teoría para explicar los procesos de las partículas moleculares, atómicas, nucleares y subatómicas suele oscurecer el hecho de que la propia teoría se basa en principios tan asombrosos que sus consecuencias totales no suelen apreciarlas ni siquiera muchos profesionales de la ciencia.

En este libro he tratado de afrontar abiertamente el impacto de la teoría cuántica básica sobre nuestra concepción del mundo. El comportamiento de la materia subatómica es tan ajeno a nuestro sentido común que una descripción de los fenómenos cuánticos suena a algo así como Alicia en el país de las maravillas. El propósito del presente libro, sin embargo, no consiste tan sólo en pasar revista a una rama notoriamente difícil de la física moderna, sino en entrar en temas más amplios. ¿Qué es el hombre? ¿Cuál es la naturaleza de la realidad? ¿Es el universo que habitamos un accidente aleatorio o el resultado de un exquisito proceso de selección?

La cuestión de por qué el cosmos tiene la concreta estructura y organización que observamos ha intrigado desde hace mucho a los teólogos. En los últimos años, los descubrimientos de la física y la

cosmología han abierto nuevas perspectivas de aproximación científica a estas cuestiones. La teoría cuántica nos ha enseñado que el mundo es un juego de azar y que nosotros formamos parte de los jugadores; que podrían haberse elegido otros universos, que incluso pueden existir paralelamente al nuestro o bien en regiones remotas de espacio-tiempo.

El lector no necesita tener ningún conocimiento previo de ciencia ni de filosofía. Aunque muchos de los temas aquí tratados requieren cierta gimnasia mental, he intentado explicar cada nuevo detalle, desde el punto de partida, en el lenguaje más elemental. Si algunas de las ideas cuesta creerlas, eso da testimonio de los profundos cambios acaecidos en la visión científica del mundo que han acompañado al gran progreso de las últimas décadas.

A modo de reconocimiento, me gustaría decir que he disfrutado de fructíferas conversaciones con el Dr. N. D. Birrel, el Dr. L. H. Ford, el Dr. W. G. Unruth y el profesor J. A. Wheeler sobre buena parte de las materias de que aquí se habla.

Prólogo
La revolución inadvertida

Las revoluciones científicas tienden a asociarse con las grandes reestructuraciones de las perspectivas humanas. El alegato de Copérnico de que la Tierra no ocupaba el centro del universo inició la desintegración del dogma religioso y dividió a Europa; la teoría de Darwin de la evolución derrumbó la centenaria creencia en el especial papel biológico de los humanos; el descubrimiento por Hubble de que la Vía Láctea no es sino una más entre los miles de millones de galaxias desperdigadas a todo lo ancho de un universo en expansión abrió nuevos panoramas de la inmensidad celestial. Por tanto, no deja de ser llamativo que la mayor revolución científica de todos los tiempos haya pasado en buena medida desapercibida para el público en general, no porque sus implicaciones carezcan de interés, sino porque son tan destructivas que casi resultan increíbles, incluso para los propios revolucionarios de la ciencia.

La revolución a que nos referimos tuvo lugar entre 1900 y 1930, pero pasados más de cuarenta años todavía truena la polémica sobre qué es exactamente lo que se ha descubierto. Conocida en general como la teoría cuántica, se inicia como tentativa de explicar determinados aspectos técnicos de la física subatómica. Desde entonces, se ha desarrollado incorporando la mayor parte de la microfísica moderna, desde las partículas elementales hasta el láser, y ninguna persona seria duda de que la teoría sea cierta. Lo

que está en cuestión son las extraordinarias consecuencias que se derivarían de adoptar la teoría literalmente.

Aceptarla sin restricciones conduce a la conclusión de que el mundo de nuestra experiencia —el universo que realmente percibimos— no es el único universo. Coexistiendo a su lado existen miles de millones de otros universos, algunos casi idénticos al nuestro, otros disparatadamente distintos, habitados por miríadas de copias casi exactas de nosotros mismos, que componen una gigantesca realidad multifoliada de mundos paralelos.

Para eludir este estremecedor espectro de esquizofrenia cósmica, cabe interpretar la teoría de manera más sutil, aunque sus consecuencias no sean menos fantasmagóricas. Se ha argumentado que los otros universos no son reales, sino tan sólo tentativas de realidad, mundos alternativos fallidos. No obstante, no se pueden ignorar, pues es central para la teoría cuántica, y se puede comprobar experimentalmente, que los mundos alternativos no siempre están completamente desconectados del nuestro: se superponen al universo que nosotros percibimos y tropiezan con sus átomos. Tanto si sólo son mundos fantasmales como si son tan reales y concretos como el nuestro, nuestro universo no es en realidad más que una infinitésima loncha de la gigantesca pila de imágenes cósmicas: el superespacio. Los siguientes capítulos explicarán qué es este superespacio, cómo funciona y dónde nos acomodamos nosotros, los habitantes del superespacio.

Habitualmente se cree que la ciencia nos ayuda a construir un

cuadro de la realidad objetiva: el mundo exterior. Con el advenimiento de la teoría cuántica, esa misma realidad parece haberse desmoronado, siendo sustituida por algo tan revolucionario y extravagante que sus consecuencias aún no han sido debidamente afrontadas. Como veremos, o bien se acepta la realidad múltiple de los mundos paralelos o bien se niega que el mundo real exista en absoluto, con independencia de nuestra percepción de él. Los experimentos de laboratorio realizados en los últimos años han demostrado que los átomos y las partículas subatómicas, que la gente suele imaginar como cosas microscópicas, no son en absoluto cosas, en el sentido de tener una existencia independiente bien definida y una identidad diferenciada e individual. Sin embargo, todos nosotros estamos compuestos de átomos: el mundo que nos rodea parece dirigirse de manera inevitable a una crisis de identidad.

Estos estudios demuestran que la realidad, en la medida en que realidad quiera decir algo, no es una propiedad del mundo exterior de por sí, sino que está íntimamente trabada a nuestra percepción del mundo, a nuestra presencia como observadores conscientes. Quizá sea esta conclusión, más que ninguna otra, la que aporte mayor significación a la revolución cuántica, pues, a diferencia de todas las revoluciones científicas anteriores, que apartaron progresivamente a la humanidad del centro de la creación y le otorgaron el mero papel de espectadora del drama cósmico, la teoría cuántica repone al observador en el centro de la escena. De hecho,

algunos científicos destacados han llegado tan lejos como a sostener que la teoría cuántica ha resuelto el enigma del entendimiento y de sus relaciones con el mundo material, afirmando que la entrada de información a la conciencia del observador es el paso fundamental para la creación de la realidad. Llevada a su extremo, esta idea supone que el universo sólo alcanza una existencia concreta como resultado de esta percepción: ¡lo crean sus propios habitantes!

Tanto si se aceptan como si no estas últimas paradojas, la mayoría de los físicos está de acuerdo en que, al menos en el plano atómico, la materia se mantiene en un estado de animación suspendida, de irrealidad, hasta que se efectúa una medida u observación real. Examinemos con detalle este curioso limbo que corresponde a los átomos cogidos entre muchos mundos e indecisos de adonde ir. Nos preguntaremos si este limbo se reduce a lo subatómico o bien si puede entrar en erupción dentro del laboratorio e infiltrarse en el cosmos. Las famosas paradojas del gato de Schrödinger y del amigo de Wigner, en la que se coloca un individuo, aparentemente, en un estado de vida-muerte y se le pide que relate sus sensaciones, se examinarán con vistas a asegurarse de la verdadera naturaleza de la realidad.

En la teoría cuántica ocupa un lugar central la incertidumbre inherente del mundo subatómico. El deseo de creer en el determinismo, donde todo acontecimiento tiene su causa en algún acontecimiento anterior y el mundo se despliega según un esquema ordenado y regido por leyes, está profundamente arraigado y

constituye el fundamento de muchas religiones. Albert Einstein se adhirió firmemente a esta creencia durante toda su vida y no pudo aceptar la teoría cuántica en su forma convencional, pues la revolución cuántica inyecta un elemento aleatorio en el nivel más básico de la naturaleza. Todos nosotros sabemos que la vida es algo arbitrario y que nunca es posible predecir con exactitud el futuro de los sistemas complejos, como son el tiempo o la economía, pero la mayor parte de la gente cree que el mundo es en principio predecible, con tal de disponer de la suficiente información. Los físicos solían creer que incluso los átomos obedecían determinadas reglas, moviéndose según algún sistema de actividad preciso. Hace dos siglos, Pierre Laplace afirmó que, si se conocieran todos los movimientos atómicos, se podría trazar todo el futuro del universo.

Los descubrimientos que han tenido lugar en el primer cuarto de este siglo han revelado que en la naturaleza existe un aspecto rebelde. Dentro de lo que parece ser un cosmos regido por leyes, hay un azar —una especie de anarquía microscópica— que destruye la predicibilidad mecánica e introduce una incertidumbre absoluta en el mundo del átomo. Sólo las leyes probabilísticas regulan lo que por lo demás es un microcosmos caótico.

Pese a la protesta de Einstein de que Dios no juega a los dados, al parecer el universo es un juego de azar y nosotros no somos meros espectadores, sino jugadores. Si es Dios o si es el hombre quien lanza los dados, resulta que depende de si en realidad existen o no múltiples universos.

Sea azar o elección, el universo que realmente percibimos ¿es un accidente o lo hemos elegido entre un desconcertante haz de alternativas? Seguramente la ciencia no tiene ninguna tarea más urgente que la de descubrir si la estructura del mundo que nos rodea —la ordenación de la materia y de la energía, las leyes a que obedecen, las cantidades que han sido creadas— es un mero capricho del azar o si es una organización profundamente significativa de la que somos una parte esencial. En las secciones posteriores del libro se presentarán, a la luz de los más recientes descubrimientos astrofísicos y cosmológicos, algunas ideas nuevas y radicales sobre este particular.

Se sostendrá que muchos de los rasgos del universo que observamos no pueden separarse del hecho de que estamos vivos para observarlos, pues la vida está muy delicadamente equilibrada dentro de las escalas del azar. Si se acepta la idea de los universos múltiples, habremos elegido como observadores una esquina diminuta y remota del superespacio que no es en absoluto característica del resto, una isla de vida en medio de los precipicios de las dimensiones deshabitadas. Esto plantea el problema filosófico de por qué la naturaleza incluye tanta redundancia. ¿Por qué produce tantos universos cuando, salvo una pequeña fracción, han de pasar desapercibidos? Por el contrario, si se relegan los demás universos a mundos fantasmales, tendremos que considerar nuestra existencia como un milagro tan improbable como difícil de creer. La vida resultará ser entonces verdaderamente azarosa, más

azarosa de lo que nunca habíamos pensado.

La incertidumbre inherente a la naturaleza no se limita a la materia, sino que incluso controla la estructura del espacio y del tiempo. Demostraremos que estas entidades no son meramente el escenario sobre el que se desarrolla el drama cósmico, sino que forman parte del reparto. El espacio y el tiempo cambian de forma y extensión —dicho sin rigor, van y vienen— y, al igual que la materia subatómica, su movimiento tiene algo de aleatorio e incontrolado. Veremos cómo en la escala ultramicroscópica los movimientos incontrolados pueden destrozar el espacio y el tiempo, dotándoles de una especie de estructura hueca y espumosa, llena de túneles y puentes.

Nuestra vivencia del tiempo está estrechamente unida a nuestra percepción de la realidad y cualquier intento de construir un mundo real deberá hacer frente a las paradojas del tiempo. El rompecabezas más profundo de todos es el hecho de que, al margen de nuestra experiencia mental, el tiempo no pasa ni hay pasado, presente y futuro. Estas afirmaciones son tan pasmosas que la mayor parte de los científicos llevan una doble vida, aceptándolas en el laboratorio y rechazándolas sin pensarlo en la vida cotidiana. Pero la noción de un tiempo en movimiento no tiene virtualmente sentido ni siquiera en los asuntos cotidianos, pese al hecho de que domine nuestro lenguaje, pensamientos y acciones.

Quizás ahí radiquen los nuevos avances, en desenredar el misterio de los vínculos entre el tiempo, el entendimiento y la materia.

Muchos de los temas de este libro son más raros que si fueran inventados, pero lo que debe destacarse no es su peculiaridad, sino el que la comunidad científica los conoce desde hace mucho sin haber intentado comunicarlos a la opinión pública. Probablemente en razón, sobre todo, de la naturaleza excepcionalmente abstracta de la teoría cuántica, más el hecho de que por regla general sólo se accede a ella con ayuda de matemáticas muy avanzadas. Desde luego, muchos de los temas de los siguientes capítulos desafiarán la imaginación del lector, pero las cuestiones son tan profundas e importantes para nosotros que se debe intentar salvar distancias y comprenderlas.

Capítulo I
Dios no juega a los dados

A comienzos de la década de 1920, un físico norteamericano, Clinton Joseph Davisson, inició una serie de investigaciones para la Bell Telephone Company en las que bombardeaba cristales de níquel con un haz de electrones similar al haz que produce la imagen en las pantallas de televisión. Percibió algunas regularidades curiosas en el modo en que los electrones se esparcían por la superficie del cristal, pero no comprendió de inmediato su enorme importancia. Varios años después, en 1927, Davisson dirigió una versión mejorada del mismo experimento con un colega más joven, Lester Halbert Germer. Las regularidades eran muy pronunciadas, pero lo más importante fue que ahora se esperaban, en base a una notable teoría nueva de la materia desarrollada a mitad de los años veinte. Davisson y Germer estaban observando directamente y por primera vez un fenómeno que dio lugar al hundimiento de una teoría científica sólidamente implantada durante siglos y que volvía del revés nuestras nociones del sentido de la realidad, de la naturaleza de la materia y de nuestra observación de la misma.

En realidad, tan profunda es la revolución del conocimiento consiguiente y tan extravagantes son las consecuencias que incluso Albert Einstein, quizás el científico más brillante de todos los tiempos, se negó durante toda su vida a aceptar algunas de ellas.

La nueva teoría se conoce ahora como la mecánica cuántica y nosotros vamos a examinar sus asombrosas consecuencias sobre la naturaleza del universo y de nuestro propio papel dentro de él. La mecánica cuántica no es una mera teoría especulativa del mundo subatómico, sino un complejo entramado matemático que sostiene la mayor parte de la física moderna.

Sin teoría cuántica, nuestra comprensión global y pormenorizada de los átomos, los núcleos, las moléculas, los cristales, la luz, la electricidad, las partículas subatómicas, el láser, los transistores y otras muchas cosas se desintegraría. Ningún científico duda seriamente de que las ideas fundamentales de la mecánica cuántica sean correctas. Sin embargo, las consecuencias filosóficas de la teoría son tan pasmosas que, incluso pasados cincuenta años, todavía resuena la controversia sobre lo que en realidad significa. Para apreciar la profundidad de la revolución cuántica hace falta entender, en primer lugar, la imagen clásica de la naturaleza tal como la concebían los científicos por lo menos hasta el siglo XVII.

En los primeros tiempos, cuando los hombres y las mujeres comenzaron a preguntarse por los acontecimientos naturales que ocurrían a su alrededor, su imagen del mundo era bastante distinta de la que tenemos hoy. Se daban cuenta de que ciertos acontecimientos eran regulares y seguros, como los días y las estaciones, las fases de la luna y los movimientos de las estrellas, mientras que otros eran arbitrarios y en apariencia aleatorios, como las tormentas, los terremotos y las erupciones volcánicas. ¿Cómo

organizar este conocimiento en forma de una explicación de la naturaleza? En algunos casos, un acontecimiento natural podía tener una explicación evidente; por ejemplo, cuando el calor del sol derretía la nieve. Pero la exacta noción de causa-efecto no estaba bien formulada. En su lugar, debió parecerles lo más natural modelar el mundo según el sistema que mejor entendían: ellos mismos. Es fácil comprender por qué los fenómenos naturales llegaron a considerarse manifestaciones del temperamento y no de la causalidad. Así, los acontecimientos regulares y seguros reflejaban una actividad plácida y benevolente, mientras que los acontecimientos súbitos y quizá violentos se atribuían a un temperamento petulante, airado y neurótico. Una consecuencia de lo anterior fue la astrología, en la que el aparente orden de los cielos se tomaba por el reflejo de una organización más amplia que aunaba la naturaleza humana y la celeste en un sistema único.

En algunas sociedades los sistemas animistas cristalizaron y se convirtieron en personalidades reales. Existía el espíritu del bosque, el espíritu del río, el espíritu del fuego, etcétera. Las sociedades más desarrolladas elaboraron una jerarquía de dioses compleja y muy antropomórfica. El sol, la luna, los planetas, incluso la misma Tierra, se consideraban personalidades similares a las humanas y los acontecimientos que les sobrevenían, un reflejo de los bien conocidos deseos y emociones humanos. «Los dioses están furiosos» debía considerarse una explicación suficiente de alguna calamidad natural, y se hacían los adecuados sacrificios. El poder de estas

ilustres personalidades se tomaba muy en serio, probablemente hasta el punto de constituir la mayor fuerza sociológica.

Paralelamente a esta evolución surgió un nuevo conjunto de ideas fruto de la creación de asentamientos urbanos y de la aparición de los estados nacionales. Para evitar la anarquía, se contaba con que los ciudadanos se adaptaran a un estricto código de conducta que se institucionalizó en forma de leyes. También los dioses estaban sometidos a leyes y, a su vez, en virtud de su mayor poder y autoridad, refrendaban el sistema de leyes humanas con ayuda de sus intermediarios, los sacerdotes. En la temprana civilización griega, el concepto de un universo regido por leyes estaba muy avanzado. De hecho, la explicación de los acontecimientos naturales rutinarios, como el vuelo de un proyectil o la caída de una piedra, comenzaban a formularse como «infalibles leyes de la naturaleza». Esta nueva y deslumbrante idea de que los fenómenos ocurrían sin supervisión, estrictamente de acuerdo con la ley natural, planteaba un agudo contraste con la otra visión de un mundo orgánico regulado por los estados de ánimo. Desde luego, los fenómenos verdaderamente importantes —los ciclos astronómicos, la creación del mundo y el mismo hombre— seguían precisando la estrecha atención de los dioses, pero las cuestiones normales se desenvolvían por su propia cuenta. No obstante, una vez que echó raíces la idea de un sistema material que actúa según un conjunto de principios fijos e inviolables, resultó inevitable que el dominio de los dioses fuera progresivamente erosionándose conforme se iban

descubriendo mayor número de nuevos principios.

Aunque ni siquiera en la actualidad ha desaparecido del todo la explicación teológica del mundo material, los pasos decisivos para asentar el poder de las leyes físicas se dieron, hablando en sentido muy amplio, con Isaac Newton y Charles Darwin. Durante el siglo XVI, un gigante intelectual, Galileo Galilei, inició lo que hoy llamaríamos una serie de experimentos de laboratorio. La idea clave era que al aislar, en la medida de lo posible, un fragmento del mundo de las influencias ambientales, quedaría en condiciones de comportarse de un modo muy simple. Esta creencia en la simplicidad última de la complejidad ha sido la fuerza impulsora de la investigación científica durante milenios, y hoy se mantiene intacta, pese a los sobresaltos que, como veremos, ha recibido en los últimos tiempos.

Una de las famosas investigaciones que llevó a cabo Galileo consistió en observar la caída de los cuerpos. Por regla general, se trata de un proceso muy complejo que depende del peso, la forma, la distribución de la masa y el movimiento interno del cuerpo, así como de la velocidad del viento, la densidad del aire, etcétera. La genialidad de Galileo consistió en señalar que todos estos rasgos sólo eran complicaciones incidentales agregadas a lo que realmente era una ley muy sencilla. Al reducir los efectos de la resistencia del aire y utilizar cuerpos de formas regulares, haciéndolos rodar por planos inclinados (en lugar de dejarlos caer directamente), simulando de este modo el efecto de una gravedad muy reducida,

Galileo se las arregló para salvar la complejidad y aislar la ley fundamental de la caída de los cuerpos. Lo que hizo en esencia fue medir el tiempo que necesitaban los cuerpos para caer desde distintas distancias. En la actualidad puede parecer un procedimiento muy razonable, pero en el siglo XVII fue un golpe de genio. En aquellos días, la idea del tiempo era absolutamente distinta de la nuestra: por ejemplo, no se aceptaba la idea de un paso matemáticamente regulado del tiempo. La duración temporal era desde siempre mucho más afín a las antiguas ideas orgánicas, y su concreción antes procedía de los ritmos naturales del cuerpo humano, de las estaciones y del ciclo celeste, que de los relojes de precisión. Con el descubrimiento de América y el establecimiento de los viajes transatlánticos regulares, las fuertes presiones militares y comerciales estimularon la búsqueda de sistemas de navegación este-oeste más exactos. Pronto se comprendió que, mediante la combinación de una exacta determinación de la posición de las estrellas y de una exacta medición del tiempo, era posible calcular la longitud de un buque en medio del océano. De este modo se inició la construcción de observatorios y la ciencia de la moderna astronomía posicional, así como la invención de relojes cada vez más exactos.

Aunque vivió una generación antes de que Newton formalizara la idea de un «tiempo absoluto, cierto y matemático» y a dos siglos de distancia de los horarios de trenes que por fin introdujeron este concepto en la vida de la gente común, Galileo identificó

correctamente el papel central del tiempo para describir los fenómenos del movimiento. Su premio fue el descubrimiento de una ley de una simplicidad desarmante: el tiempo que se tarda en caer una distancia partiendo del estado de reposo es exactamente proporcional a la raíz cuadrada de la distancia. Había nacido la ciencia. Había nacido la idea de que una «fórmula matemática», en lugar de un dios, supervisara el comportamiento del sistema material.

El impacto de este descubrimiento no puede subvalorarse. Una ley de la naturaleza en forma de ecuación matemática no sólo implica simplicidad y universalidad, sino también manejabilidad. Significaba que ya no será necesario seguir observando el mundo para asegurarse de su comportamiento; también podrá calcularse con papel y lápiz. Al utilizar las matemáticas para modelar las leyes, el científico podía predecir el comportamiento futuro del mundo y retroceder cómo se había comportado en los tiempos pasados.

Por supuesto, en el mundo no sólo hay cuerpos que caen, y hubo que esperar hasta la monumental obra de Newton, a mediados del siglo XVII, para que se produjera el impacto completo de estas nuevas ideas revolucionarias. Newton fue más lejos que Galileo y elaboró detalladamente un sistema global de mecánica, capaz de afrontar en principio todo tipo de movimientos, que funcionó. La nueva perspectiva de la física exigía nuevos progresos en las matemáticas para describir las leyes descubiertas por Newton. Se inventó el llamado cálculo diferencial e integral. Una vez más, el

tiempo desempeñó un papel central como catalizador de estos progresos. ¿Con cuánta rapidez cambiaría su velocidad un cuerpo sometido a la actividad de una determinada fuerza? ¿Con cuánta rapidez variaría la fuerza al desplazarse su lugar de origen? Este era el tipo de preguntas a que debían responder los nuevos matemáticos. La mecánica de Newton es una descripción del mundo en concordancia con el paso del tiempo.

Como consecuencia de esta reorientación del pensamiento, se plantearon nuevas cuestiones sobre el universo en las que el tiempo y el cambio ocupaban un lugar destacado. Mientras que en las culturas más antiguas la armonía y el equilibrio —rasgos tan importantes para el bienestar de los organismos biológicos— constituían los aspectos sobresalientes, la mecánica de Newton ponía el acento en las cuestiones dinámicas de la naturaleza. Quizá no sea una coincidencia que, a pesar del explosivo desarrollo de la civilización en la época clásica, las culturas prerrenacentistas fuesen en gran medida estáticas, preocupadas por mantener el status quo. En contraposición, Galileo y Newton, y más adelante Darwin, introdujeron el concepto crucial de evolución en la visión humana de la naturaleza. Como tantas veces ha ocurrido en el desarrollo del pensamiento humano, lo que conduce a las revoluciones intelectuales es más bien un cambio de perspectiva que una información nueva. Otras culturas se habían ocupado de temas tales como la manera de evitar el disgusto del dios de las tormentas y asegurar una buena cosecha, pero Newton y sus

matemáticas apuntaban a un tipo de problema completamente nuevo: dado el estado actual de un sistema físico, ¿cómo evolucionará en el futuro? ¿Cuál será el estado final resultante de un conjunto dado de condiciones iniciales?

Estos progresos intelectuales fueron acompañados de cambios sociales: la revolución industrial, la búsqueda sistemática de nuevos conocimientos y tecnología y, sobre todo, el concepto —tan dado hoy por supuesto— de una comunidad «en vías de progreso» hacia un mejor nivel de vida y un mejor control de su medio ambiente. La transición de una sociedad estática, influida por la naturaleza temperamental, a una sociedad dinámica que persigue el control de la naturaleza, debe mucho a la nueva mecánica y su crucial concepto de evolución temporal.

Otra idea importante que fue adecuadamente clarificada por la mecánica de Newton es la de los futuros alternativos, una noción central para el tema de este libro. Para comprender sus implicaciones se requiere un cuidadoso examen de qué es exactamente lo que se quiere decir con las leyes matemáticas de la naturaleza. Como sabemos, Galileo y Newton descubrieron que el movimiento de los cuerpos materiales no es casual y aleatorio, sino que está determinado por matemáticas sencillas. Así pues, dada una información sobre el estado de un cuerpo y su entorno en un instante determinado, es posible (al menos en principio) calcular el comportamiento de ese cuerpo en el futuro (y en el pasado). Cuidadosos experimentos confirman que esto es cierto. Todo el

espíritu de la idea consiste en que el mundo no puede cambiar de cualquier manera: los caminos disponibles para el desarrollo se limitan a los que se ajustan a las leyes. Pero, ¿hasta qué punto es restrictiva esta limitación? Nuestra experiencia de la naturaleza, repleta de una rica y en apariencia ilimitada variedad de actividades interesantes y complejas, no enlaza fácilmente con un mundo tan rígido.

La reconciliación de la complejidad y la obediencia se encuentra en la forma de las matemáticas que se necesitan y en su relación con la exigencia de información sobre el sistema en algún momento inicial. Para precisar lo dicho, podemos considerar la sencilla cuestión práctica de lanzar una bola. Newton nos enseñó que la trayectoria de un proyectil no es arbitraria, sino que debe ser una curva bien determinada de acuerdo con leyes matemáticas. Sin embargo, este mundo resultaría aburrido para los deportistas si todas las bolas que se lanzaran siguieran exactamente la misma trayectoria y, desde luego, sabemos que eso no ocurre. En realidad, las leyes no determinan en absoluto una única trayectoria, sino tan sólo un tipo de trayectoria. En el caso que nos ocupa, toda bola seguirá una trayectoria parabólica, pero hay una infinita variedad de parábolas. (La parábola es la forma que se obtiene al cortar un cono paralelamente a la cara opuesta. Es el borde curvo del cono truncado). Hay parábolas altas y delgadas, que corresponden a bolas lanzadas casi verticalmente, parábolas largas y bajas, como la trayectoria de una pelota de béisbol, etcétera. De hecho, la

experiencia demuestra que controlamos de dos modos la forma de la trayectoria. Podemos decidir el tamaño de la parábola variando la velocidad a que lanzamos la bola y podemos variar la forma de la parábola alterando el ángulo de lanzamiento. De manera que existe una ley física según la cual todas las bolas siguen trayectorias parabólicas, pero la parábola que sigan vendrá determinada por dos condiciones iniciales independientes: la velocidad y el ángulo.

El objetivo de esta digresión sobre balística elemental es señalar que en la naturaleza hay algo más que leyes. Hay también condiciones iniciales. Ahora podemos clarificar la cuestión de qué información se precisa para determinar el comportamiento concreto de un cuerpo según la mecánica newtoniana. En primer lugar, necesitamos conocer la magnitud y la dirección de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y cómo varían en el tiempo, y en segundo lugar la posición y la velocidad del cuerpo en algún momento, que también debe especificarse. Dados todos estos datos, calcular dónde estará el cuerpo y cómo se moverá en un momento posterior es una simple cuestión matemática. Uno de los primeros éxitos de la mecánica de Newton consistió en explicar los tamaños, las formas y los períodos de las órbitas planetarias del sistema solar. Los planetas, incluida la Tierra, están atrapados en órbitas alrededor del Sol por la gravedad de este último cuerpo. Para calcular los movimientos del sistema solar, Newton tenía que conocer tanto la intensidad como la dirección de la fuerza gravitatoria solar en todos los lugares del espacio, y también las condiciones iniciales, es decir, las posiciones

y velocidades de los planetas en un determinado momento. Esta última información podían aportarla los astrónomos, que controlan rutinariamente tales cuestiones, pero la fuerza de la gravedad era un asunto completamente distinto. Generalizando los resultados de Galileo sobre la gravedad terrestre, Newton conjeturó acertadamente que el Sol, y de hecho todos los cuerpos del universo, ejercen una fuerza gravitatoria que disminuye con la distancia de acuerdo con otra ley matemática exacta y simple: la llamada ley de la gravitación universal. Una vez matematizado el movimiento, Newton matematizó asimismo la gravedad. Conjuntando ambas cosas y utilizando el cálculo logró un gran triunfo al predecir correctamente el comportamiento de los planetas.

Desde los tiempos de Newton, esta mecánica se ha aplicado a todos los pormenores del sistema solar. Es posible mejorar los cálculos originales teniendo en cuenta las diminutas fuerzas gravitatorias que actúan entre los mismos planetas, así como los efectos de su rotación, las distorsiones de sus formas, etcétera. Una operación habitual consiste en calcular la órbita de la Luna y, a partir de ahí, predecir las fechas de los eclipses futuros. Del mismo modo, el cálculo puede aplicarse retrospectivamente para determinar las fechas de los eclipses pasados y compararlos con los datos históricos.

La aplicación de la mecánica newtoniana al sistema solar fue algo más que un ejercicio. Hizo saltar por los aires la creencia secular de que los cielos estaban gobernados por fuerzas puramente

celestiales. Incluso el gran refugio de los dioses sucumbió ante las matemáticas de Newton. Nunca ha habido una demostración más espectacular del poder de la ciencia basada en leyes matemáticas. Significaba que las leyes de la naturaleza no sólo controlaban los procesos menores de la Tierra, como la forma de la trayectoria de los proyectiles, sino que también gobernaban la misma estructura del cosmos: una ampliación del horizonte hasta lo cósmico que alteró profundamente las concepciones de la humanidad sobre la naturaleza del universo y su propio lugar dentro de él.

Las profundas consecuencias filosóficas de la revolución newtoniana son más claras en cosmología: el estudio de la totalidad de las cosas. Según Newton, el movimiento de toda partícula material, de todo átomo, está en principio total y absolutamente determinado para todo el tiempo pasado y futuro con tal de conocer las fuerzas imprimidas y las condiciones iniciales. Pero las propias fuerzas, a su vez, están determinadas por la localización y el estado de la materia. Por ejemplo, la fuerza gravitatoria solar es fija una vez que conocemos su posición. De ahí se deduce que, una vez que conozcamos las posiciones y los movimientos de todos los fragmentos de materia, y suponiendo que conozcamos también las leyes que rigen las fuerzas entre los fragmentos, podremos calcular toda la historia del universo, tal como señaló Pierre Laplace.

Ahora bien, debe decirse desde el principio que no se dispone de tal conocimiento y que, aun cuando lo tuviésemos, no habría computadora lo bastante grande para realizar los cálculos. En la

práctica, por supuesto, sólo es posible calcular los subsistemas muy simples y relativamente aislados (por ejemplo, el sistema solar). Sin embargo, como cuestión de principio continúa teniendo unas implicaciones sobrecoged o ras. La antigua concepción del cosmos como sociedad de temperamentos que coexisten en equilibrio deja paso a la imagen inanimada e incluso estéril del «universo mecánico». Inevitablemente, los descubrimientos de Newton parecen relegar el mundo entero a la condición de mecanismo que marcha inexorable y sistemáticamente adelante hacia un destino preestablecido, donde cada átomo corre siguiendo una trayectoria retorcida pero legislada hasta alcanzar un destino inalterable. Finalmente este cambio de perspectiva tuvo su impacto sobre la religión. La primitiva idea cristiana de un Dios activo que participaba de cerca en los negocios mundanos, supervisando los acontecimientos, desde la concepción de los niños hasta las fases de la Luna, fue sustituida por una idea más lejana de Dios como iniciador del movimiento cósmico, que observa pasivamente el desenvolvimiento de su creación según sus propias leyes matemáticas. El espíritu de esta transformación en divina pasividad y automática legalidad lo capta Robert Browning en su poema Pippa Passes: «Dios en su cielo, / Todo en orden en el mundo». El universo mecánico, que se desarrolla uniformemente según un plan, había llegado: fue tal el impacto del pequeño prodigio del genio de Newton que Pope escribiría: «Dios dijo: « ¡Que exista Newton!» y todo se iluminó».

A pesar del pasmoso logro intelectual de imponer disciplina a un cosmos indomable, la creación por obra de Newton de un universo conformado a leyes rígidas tiene un aspecto profundamente deprimente. Cuando se ha hecho formar hasta el último átomo, como si dijéramos, hay una chispa de vida que desaparece del mundo. Un mecanismo de relojería puede ser muy hermoso y eficiente, pero la imagen de un universo que corcovea insensatamente camino de la eternidad, cual caja de música de grotesca complejidad, no resulta demasiado tranquilizadora, sobre todo teniendo en cuenta que nosotros formamos parte de ese universo. Una víctima evidente de tal visión es el libre albedrío. Si la entera condición del pasado y del futuro de la materia estuviera únicamente determinada por su condición en cualquier instante concreto, entonces nuestro futuro estaría obviamente predeterminado hasta el último detalle. Cualquier decisión que tomemos, cualquier antojo, estarían en realidad acordados desde hace miles de millones de años como el inevitable resultado de una red de fuerzas e influencias asombrosamente intrincada pero totalmente predeterminada.

En la actualidad, los científicos reconocen varios fallos en el razonamiento que conduce a un universo predeterminado y mecánico, pero, incluso dando por sentada la idea esencial, no debe suponerse que las leyes newtonianas sean tan restrictivas que sólo permitan un único universo posible. Al igual que una bola puede seguir cualquier trayecto entre una infinita variedad de ellos, así

también el conjunto del universo sigue una infinita diversidad de trayectorias hacia el futuro. Las condiciones iniciales determinan cuál es exactamente la trayectoria elegida. Esto plantea la cuestión fundamental de qué se entiende por inicial. Más adelante veremos que los cosmólogos modernos creen que el universo no ha existido siempre, de manera que debe haber habido alguna clase de creación, aunque debió ocurrir hace unos quince mil millones de años. De modo que tiene sentido reflexionar sobre los siguientes problemas, todos ellos fascinantes. ¿Qué condiciones iniciales de la creación condujeron al universo que hoy contemplamos? ¿Eran condiciones muy especiales o, por el contrario, poseían características muy generales? ¿Qué clase de universo hubiera resultado de ser las condiciones distintas?

La filosofía que subyace a lo dicho es que nuestro universo no es más que uno del infinito conjunto de universos posibles: tan sólo un camino particular hacia el futuro. Podemos estudiar las otras trayectorias con ayuda de las matemáticas. Podemos sondear la naturaleza de esa miríada de mundos alternativos que pudieron haber existido y preguntarnos: ¿por qué éste? En los siguientes capítulos veremos cuán estrechamente está implicada nuestra existencia en estas cuestiones y cómo esos otros mundos fantasmales no son meras curiosidades académicas sino que realmente dejan sentir su presencia en el mundo concreto que conocemos.

Una de las rarezas del universo mecanicista de Newton es su

patente contradicción con la experiencia. Buena parte del mundo que nos rodea parece acaecer más bien por azar que por designio. Compárese, por ejemplo, el comportamiento de una bola con el de una moneda lanzada al aire. Ambas se mueven según los principios de la mecánica de Newton. Si se lanza la bola varias veces a la misma velocidad y en la misma dirección seguirá siempre la misma trayectoria, pero la moneda al aire unas veces saldrá cara y otras veces cruz. ¿Cómo se pueden reconciliar estas diferencias con un mundo donde la sucesión de los acontecimientos está por completo predeterminada?

Veamos en primer lugar lo que se entiende por ley natural. Tal como la concibieron los pensadores clásicos y fue incorporada más tarde a la concepción newtoniana de la mecánica, se supone que la ley describe el comportamiento de un sistema material concreto sometido a un conjunto concreto de circunstancias. Dado que las leyes naturales, por definición, se entiende que no cambian con el tiempo ni con el espacio, es evidente que están estrechamente relacionadas con la repetibilidad, un concepto fundamental a la filosofía de la verificación de teorías mediante la repetición de los experimentos. En consecuencia, si la bola lanzada se mueve según las leyes de Newton, cuando se lance la bola una y otra vez en idénticas condiciones, su trayectoria deberá ser siempre la misma.

Un buen procedimiento para analizar este problema consiste en usar el concepto, anteriormente introducido, de un conjunto de mundos. Imaginemos un conjunto (infinito si se quiere) de mundos

idénticos excepto en el recorrido de la bola. En cada uno de los mundos la bola se lanza a una velocidad y/o con un ángulo ligeramente distintos. Hay toda una serie de trayectorias, una por cada mundo; todas son parabólicas, pero no hay dos idénticas. Es útil denominar de algún modo a los distintos mundos para poder distinguirlos. Un método práctico consiste en trazar un diagrama en el que las dos condiciones iniciales —velocidad y ángulo— se conjuguen (véase Figura 1). Cada par de números (velocidad, ángulo) determina un punto en el diagrama que corresponde únicamente a un mundo concreto y a una trayectoria concreta. De este modo, cada mundo se caracteriza por un par de números.

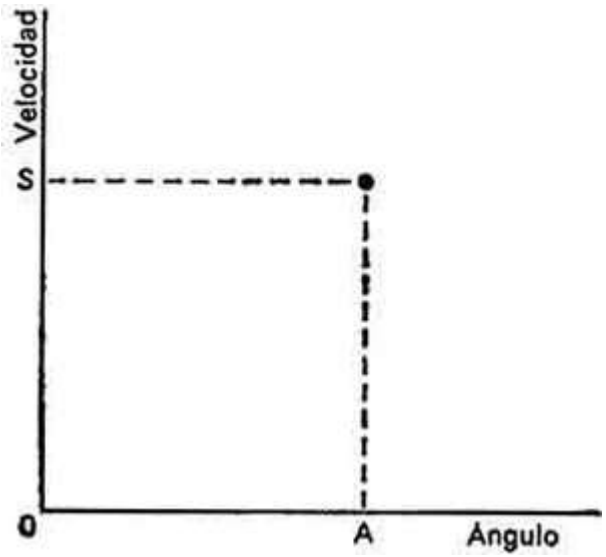

Figura 1. El punto del diagrama determina una velocidad concreta S y un ángulo A. Con estas dos condiciones iniciales queda unívocamente determinada la forma de la trayectoria de la bola según las leyes newtonianas del movimiento.

Examinemos ahora una familia de otros puntos que rodean al que nos interesa (Figura 2). Estos puntos representan otros mundos que, en cierto sentido, son vecinos muy próximos del original. Representan mundos donde las condiciones iniciales han sufrido muy ligeras perturbaciones. Si nos preguntamos por el comportamiento de la bola en estos mundos próximos, encontramos que sus trayectorias son muy similares a las del original. En suma, una pequeña variación de las condiciones iniciales causa solamente un pequeño cambio en el movimiento subsiguiente.

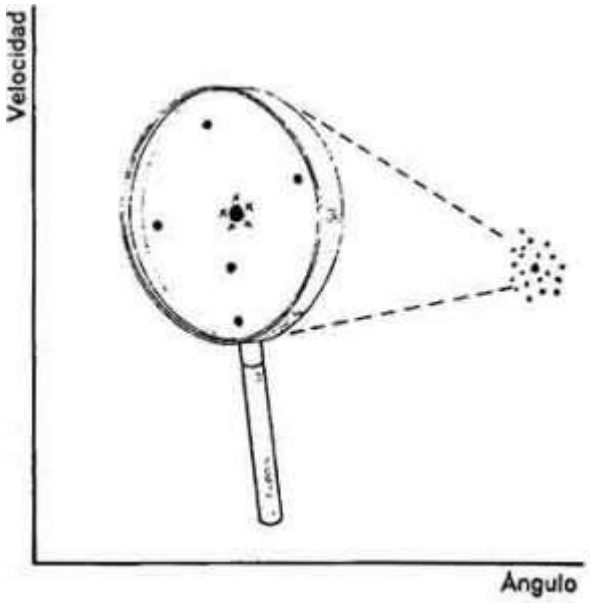

Figura 2. El conglomerado de veinte puntos próximos podría representar veinte mundos que sólo se diferenciarían en las ligeras variaciones de la trayectoria parabólica de la bola. En otro caso, podrían representar mundos en los que las bolas de billar acabaran en posiciones muy distintas. Sólo con ayuda de la lupa nos percatamos de que el último proceso no es inherentemente aleatorio,

sino muy sensible a los pequeños cambios del movimiento inicial del taco de billar. De tal modo que realmente existen puntos (señalados con cruces) muy cercanos en realidad al punto original, que conducirían a configuraciones casi idénticas de las bolas de billar.

En contraposición a lo anterior, examinemos otra situación conocida, referida esta vez a varias bolas. En el billar americano, el juego se inicia lanzando uno de los jugadores la bola blanca contra el grupo de las otras diez que forman un apretado triángulo invertido. Tras el impacto, las bolas se desperdigan por la mesa, chocando y rebotando en las bandas, hasta que finalmente se detienen (debido al rozamiento) en alguna configuración. Por muchas veces que repitamos la operación, y por mucho cuidado que tengamos en colocar igual la bola de billar, parece que nunca podemos contar con repetir exactamente la misma configuración final. Al parecer, este resultado nunca es predecible ni repetible. ¿Dónde está la coherencia con la mecánica determinista de Newton?
Volviendo a las Figura 1 y 2, sigue siendo posible designar cada uno de los miembros de nuestro conjunto de mundos mediante puntos, puesto que dado un único punto, es decir, un ángulo y una velocidad determinados de la bola de billar, la configuración final de las bolas estará determinada por las leyes.
La diferencia entre este caso y el lanzamiento de una única bola radica en las propiedades del conjunto, no de un único mundo, pues incluso condiciones iniciales en realidad enormemente

parecidas a las del caso original producirán configuraciones finales de las bolas drásticamente distintas. Cualquier cambio mínimo en la velocidad o en el ángulo repartirá las bolas de manera completamente distinta.

Como mejor pueden compararse estos dos casos es diciendo que en el primero tenemos un buen control sobre las condiciones iniciales, mientras que no ocurre así en el segundo. La configuración de las bolas del billar americano es tan sensible a las menores perturbaciones que el resultado es, más o menos, completamente aleatorio. Si aplicamos una lupa como en la Figura 2 al segundo caso, veremos que en realidad hay entornos de cada punto que, en ese mundo, producirían una configuración final de las bolas similar a la de la primera tirada. El problema es que estos puntos están de hecho muy cerca del primero, es decir, que las distancias se han acortado mucho, de tal modo que, en la práctica, nunca lograremos la misma localización dos veces.

La conclusión a sacar de este ejemplo es que, en el mundo real, la predictibilidad determinista de la naturaleza sólo se hace visible si miramos el mundo por el microscopio. Sólo si tenemos en cuenta el decurso detallado de cada átomo podemos confiar en apreciar el funcionamiento del mecanismo de relojería. A la escala ordinaria, nuestra ignorancia o nuestra falta de control de las condiciones iniciales introducen una gran componente aleatoria en el comportamiento del mundo. Durante mucho tiempo los físicos creyeron que estas limitaciones puramente prácticas eran la única

fuente de incertidumbre y azar. Se suponía que los propios átomos se movían según las leyes deterministas de la mecánica de Newton, es decir, se pensaba que los átomos sólo se diferenciaban de los objetos macroscópicos, cual las bolas de billar, en la escala. De hecho, partiendo de este supuesto, los físicos estaban en condiciones de explicar satisfactoriamente muchas de las propiedades de los gases y de los sólidos, considerándolos como una enorme acumulación de átomos cada uno de los cuales se movía según las leyes de Newton.

Por supuesto, dado que en la práctica no era posible calcular el movimiento individual de cada átomo, se adoptaron ciertos sistemas de establecer promedios. En cualquier caso, era posible prever el comportamiento aproximado del conjunto de los átomos.

Alrededor del cambio de siglo se descubrió que los átomos no son, después de todo, cuerpos sólidos indestructibles, sino que poseen una estructura interna, bastante parecida al sistema solar, con un pesado núcleo en el centro rodeado por una nube de electrones ligeros y móviles. Todo el sistema se mantiene unido gracias a las fuerzas eléctricas que atraen a los electrones negativos hacia el núcleo positivo. Es natural que los físicos buscaran en la mecánica de Newton el modelo matemático del átomo, tratando de repetir el anterior éxito de explicar los movimientos del sistema solar. Por desgracia, el modelo parecía contener un defecto fundamental. En el siglo XIX se descubrió que cuando una carga eléctrica se acelera emite radiaciones electromagnéticas, tales como ondas luminosas,

caloríficas o de radio. Un aparato transmisor de radio utiliza este principio haciendo que los electrones suban y bajen por la antena. También en los átomos los electrones se ven obligados a trazar órbitas curvas por efecto del campo eléctrico del núcleo, y esta aceleración debe hacerles emitir radiaciones. De ser así, el sistema deberá perder energía en forma de radiación y el átomo pagará el precio de encogerse. Debido a ello el electrón será atraído hacia el núcleo y tendrá que orbitar a mayor velocidad para superar el campo eléctrico más fuerte que hay allí.

El resultado será una emisión aún mayor de radiación y un encogimiento todavía más rápido. En realidad, el sistema será inestable y los átomos acabarán derrumbándose al cabo de muy poco tiempo. ¿Qué es lo que está mal?

La respuesta a este enigma no se descubrió del todo hasta la década de 1920, aunque en 1913 se dieron ya algunos tímidos pasos en esta dirección. En los capítulos posteriores examinaremos con más detalle la solución; bástenos por el momento decir que no sólo las leyes de Newton fallaban al aplicarse a los átomos, sino también otras leyes de las hasta entonces conocidas. La sustitución de la teoría no sólo demolió dos siglos de ciencia, sino que puso en cuestión algunos supuestos básicos sobre el significado de la materia y de nuestras observaciones sobre ella. Esta teoría cuántica, tal y como ahora se denomina, fue desarrollada en varias etapas entre 1900 y 1930, y tiene las más profundas consecuencias para la naturaleza del universo y para nuestra situación dentro de

él.

Los experimentos dirigidos por Davisson, que se han mencionado al principio de este capítulo, constituyeron la primera observación directa del funcionamiento de los nuevos y asombrosos principios. Como introducción a la nueva teoría, permítasenos volver sobre la idea de la ley del movimiento. Supóngase que se lanza una bola desde el lugar A y que ésta se mueve, siguiendo una trayectoria, hacia otro lugar B. Al repetir la operación cabría esperar que la bola siguiera exactamente la misma trayectoria (en la medida en que las condiciones iniciales fueran idénticas). Esta propiedad también se esperaba de los átomos y de las partículas que los constituyen, electrones y núcleos. El sorprendente descubrimiento de la teoría cuántica fue que esto no es así.

Un millar de electrones distintos se trasladarán de A a B siguiendo un millar de trayectos distintos.

A primera vista parece como si el dominio de las matemáticas sobre el comportamiento de la materia haya llegado a su fin, vencido por el espectro de la anarquía subatómica.

Es difícil excederse al subrayar las inmensas consecuencias de este descubrimiento, pues, desde que Newton descubrió que la materia se comportaba según reglas determinadas, se contaba con aplicar alguna clase de reglas a todos los niveles, desde el átomo hasta el cosmos. Ahora, sin embargo, parece que la ordenada disciplina del mundo macroscópico de nuestra experiencia se desmorone en el caos del interior del átomo.

Aunque, como veremos, el caos subatómico es en cierto sentido ineludible, este caos, por su misma naturaleza, puede dar lugar a alguna clase de orden. Para esclarecer esta enigmática afirmación, pensemos en un parque rodeado por una cerca y con dos puertas localizadas en puntos opuestos, que denominaremos A y B. Supongamos que el parque esté situado en una vía pública que se utilice con frecuencia, de manera que la gente tienda a entrar por la puerta A, atravesarlo a pie hasta B y salir.

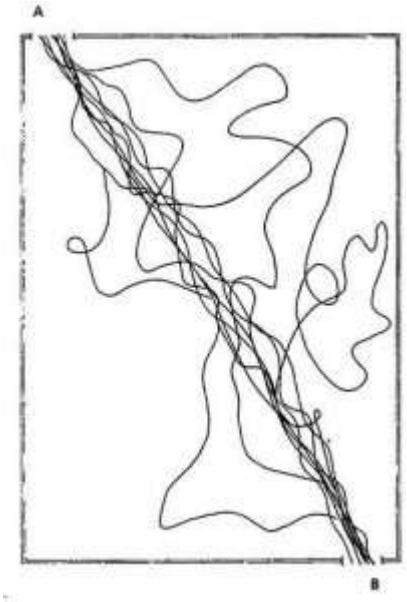

Figura 3. Recorridos por el parque. La mayor parte de la gente trata de minimizar su actividad y anda por el camino más corto, de tal modo que el conjunto de los trayectos se concentra alrededor de la línea recta que va de la entrada a la salida. Algunos tipos vitales, no obstante, llevan a cabo complicadas deambulaciones. Las partículas subatómicas también siguen una multiplicidad de trayectorias, pero prefieren las más cortas.

Si registráramos los trayectos de todos los visitantes del parque, pongamos, en una hora, nos encontraríamos con un diagrama como el de la Figura 3. Lo característico es que la mayoría de los visitantes avance según, muy aproximadamente, una línea recta que vaya de A a B. Algunos, con más tiempo o vitalidad, pasean un poco hacia alguno de los lados y unos pocos (quizá los que llevan perro o son todavía más vitales) se acercan a los límites del parque. En ocasiones sueltas se presentará un trayecto muy arbitrario (quizá de un niño). Lo que importa es que, en apariencia, las personas no se someten a ninguna ley rígida del movimiento; se consideran a sí mismas libres para elegir cualquier camino para cruzar el parque. En realidad cualquier individuo puede decidir mantenerse alejado del camino más corto. A pesar de esto, cuando se estudia un grupo lo bastante numeroso, es muy probable que haya una concentración de trayectorias alrededor de la línea recta.

Dados los suficientes sujetos, surge una especie de orden, aun cuando por regla general se quebrante la ley de «andar en línea recta». La razón es que, cuando se estudia una gran masa de personas, los caprichos y fantasías de los distintos individuos se compensan y el comportamiento colectivo muestra un inconsciente conformismo. La razón que subyace al conformismo concreto que aquí nos ocupa es que las personas, por término medio, propenden a elegir la vía más corta sin incurrir en altos niveles de actividad. El camino en línea recta desde A a B es el camino del menor esfuerzo y

de ahí que sea el seguido con mayor frecuencia por cualquier peatón. Pero no tiene que ser así; se trata de puras probabilidades.

El ejemplo de los paseantes por el parque es muy parecido al de las partículas subatómicas, que también eligen toda una diversidad de trayectorias desde A a B, aunque prefieren las que suponen menor esfuerzo. De forma que, una vez más, las trayectorias tienden a agruparse alrededor del camino que precisa menor esfuerzo. Al parecer, los electrones, lo mismo que los humanos, no quieren esforzarse demasiado. Ahora bien, lo significativo del camino de menor esfuerzo es que coincide con la trayectoria newtoniana: la trayectoria que se calcularía a partir de las leyes de Newton.

Volviendo al ejemplo de los paseantes por el parque, también podemos observar otro rasgo interesante. Es más probable que sigan la línea recta los individuos gordos, pesados, que no los ligeros (por ejemplo, los niños). Esto se debe a que el esfuerzo adicional necesario para desplazar un cuerpo pesado por una trayectoria serpenteante es mayor que en el caso de un cuerpo ligero. Igual les ocurre a las partículas de materia inanimada: las pesadas, tales como los átomos o los grupos de átomos, es más probable que se mantengan próximas a la trayectoria del mínimo esfuerzo que los electrones. Cuando las partículas son tan pesadas que son macroscópicas (por ejemplo, las bolas de billar), entonces es sumamente improbable que se aparten de la trayectoria newtoniana del mínimo esfuerzo más allá de una distancia infinitésima. Ahora estamos en condiciones de entender por qué la anarquía atómica es

coherente con la disciplina newtoniana en lo que se refiere a los objetos ordinarios. Las desviaciones de la ley están permitidas, pero son absolutamente diminutas excepto a escala subatómica, de manera que normalmente no las percibimos.

Utilizando un principio matemático comparable a la aversión humana a hacer esfuerzos innecesarios, la teoría cuántica permite calcular las probabilidades relativas de todos los distintos trayectos que pueden seguir el electrón o el átomo. Fundamentalmente, se calcula la acción necesaria para que una partícula se mueva siguiendo un trayecto dado (lo que requiere una definición precisa de acción) y se inserta en una fórmula matemática que proporciona la probabilidad de la trayectoria. En general, todas las trayectorias son posibles, pero no todas son igual de probables.

Todavía necesitamos saber cómo todo esto impide que los átomos se colapsen o derrumben. Una nueva y asombrosa revelación sobre la naturaleza de la materia subatómica, que aún demoraremos hasta el capítulo 3, es también necesaria, pero de momento puede darse una noción aproximada. Según la vieja teoría, la partícula que órbita alrededor de un núcleo debe ir trazando una espiral concéntrica conforme disipa su energía en forma de radiación electromagnética. Esta es la trayectoria clásica. Pero la teoría cuántica le permite seguir otras muchas trayectorias. Si el átomo tiene mucha energía interna, entonces el electrón se situará lejos del núcleo y su comportamiento no diferirá mucho de la representación clásica. No obstante, cuando se ha perdido cierta

cantidad de energía en forma de radiación y el electrón se acerca al núcleo, ocurre un nuevo fenómeno.

Es importante recordar que el electrón no se mueve según una única trayectoria de A a B, sino que describe órbitas. De modo que las posibles trayectorias se cruzan y vuelven a cruzarse según una complicada red, rasgo que debe tenerse en cuenta a la hora de calcular el comportamiento más probable del electrón. Resulta tener una Importancia crucial: existe un estado de mínima energía por debajo del cual la probabilidad de encontrar un electrón es estrictamente igual a cero. En sus movimientos, el electrón puede hacer excursiones momentáneas hacia el núcleo, pero le está prohibido detenerse en él. La localización media del electrón resulta estar a unas diez mil millonésimas de centímetro del núcleo, que es el radio del átomo en el estado de menor energía.

En realidad, existe toda una serie de niveles energéticos del átomo, y se emite luz cada vez que el electrón hace una transición descendente de un nivel energético a otro. Puesto que los niveles representan una energía fija, el átomo no emitirá cualquier cantidad de luz, sino pulsaciones o paquetes que contienen una determinada cantidad de energía, característica de cada tipo de átomo. Estos paquetes de energía se denominan cuantos y los cuantos de luz se conocen como fotones. La existencia de los fotones era conocida desde mucho antes de que se elaborara la teoría atómica tal como aquí se describe: la obra de Planck, junto con la explicación del efecto fotoeléctrico por Einstein, demostró que la luz sólo brota en

unidades de energía discretas. La energía de cada uno de estos fotones es proporcional a su frecuencia, de manera que la propiedad que tiene la luz de colorearse es una medida de su energía. Así pues, la luz azul, que es de frecuencia alta, contiene bastantes más fotones energéticos que los colores de baja frecuencia, como el rojo. Pero aún más, puesto que un determinado tipo de átomo (por ejemplo, el hidrógeno) sólo emite determinados cuantos, la calidad de la luz de cada clase de átomos tendrá su distintivo. Pues los colores de la luz procedentes del hidrógeno difieren completamente de los colores procedentes, pongamos, del carbono. Por supuesto, cada átomo puede emitir todo un abanico, o espectro, de colores correspondiente a toda la secuencia de niveles energéticos (desigualmente espaciados en cuanto a energía), y por eso la teoría cuántica sirve para explicar el espectro luminoso característico de los distintos productos químicos. En realidad, pueden hacerse cálculos que proporcionen, no sólo los colores exactos, sino sus intensidades relativas, calculando las probabilidades relativas que tienen los electrones de seguir las distintas trayectorias que permiten saltar entre los diferentes niveles.

Los arrolladores logros de la teoría cuántica son sobradamente impresionantes, pero no han hecho más que empezar. En los posteriores capítulos veremos aplicaciones mucho más amplias que la estructura atómica y la espectrografía. Una cosa hay que aún no se ha explicado de la forma adecuada: cómo el cruzarse y entrecruzarse de los electrones conduce a tan drásticos cambios en

su comportamiento. Hay aquí un profundo misterio. ¿Cómo sabe un electrón que ha atravesado su propia trayectoria? Un fenómeno aún más extraordinario se tratará en el capítulo 3: el electrón no sólo tiene que conocer su propia trayectoria, ¡también debe conocer las demás trayectorias que en realidad nunca sigue!

Resumiendo los rasgos más significativos de la revolución cuántica: encontramos que las leyes rígidas del movimiento son en realidad un mito. La materia tiene permitido vagar errante de manera más o menos aleatoria, sometiéndose a ciertas presiones, como es la aversión a hacer demasiado esfuerzo. El caos absoluto, pues, se elude porque la materia es perezosa al mismo tiempo que indisciplinada, de modo que, en un determinado sentido, el universo elude la total desintegración gracias a la indolencia inherente a la naturaleza.

Si bien no es posible hacer ninguna afirmación taxativa sobre ningún movimiento concreto, determinadas trayectorias son más probables que otras, de tal forma que estadísticamente podemos predecir con exactitud cómo se comportará una gran masa de sistemas similares. Aunque estos extraños rasgos sólo resultan sobresalientes a escala atómica, es evidente que el universo no es, a fin de cuentas, un mecanismo de relojería cuyo futuro esté absolutamente determinado. El mundo no está tan controlado por leyes rígidas como por el azar. Además, las incertidumbres no son una mera consecuencia de nuestra ignorancia de las condiciones iniciales, como se pensó en otro tiempo, sino una propiedad

inherente de la materia. Tan desagradable le pareció a Einstein esta aleatoriedad inherente a la naturaleza que se negó a creerla durante toda su vida, rechazando la idea con la famosa réplica: “¡Dios no juega a los dados!” No obstante, la inmensa mayoría de los físicos han llegado a aceptarla. En los siguientes capítulos se pondrán de manifiesto las sorprendentes consecuencias de un cosmos básicamente incierto.

Capítulo II

Las cosas no siempre son lo que parecen

En el último capítulo hemos visto hasta qué punto es central en nuestra visión del mundo la idea newtoniana de un tiempo matemáticamente exacto, que fluye uniforme y universalmente del pasado hacia el futuro. No vemos el mundo en forma estática, sino evolucionando, desarrollándose, cambiando de un momento al siguiente. En una época se creyó que el futuro estado del mundo, al desenvolverse de este modo, estaría predeterminado por su estado presente, pero la revolución cuántica derrocó tal idea. En lugar de eso, el futuro es inherentemente incierto. La teoría cuántica derribó el edificio de la mecánica de Newton, pero ¿qué fue de su modelo del tiempo y del espacio? Éste también se hundió, en una revolución tan profunda como la cuántica pero que la precedió en algunos años.

En 1905, Albert Einstein publicó una nueva teoría del espacio, del tiempo y del movimiento llamada la relatividad especial.

Ponía en cuestión algunos de los supuestos más apreciados y habituales sobre la naturaleza del espacio y del tiempo. Desde su primera publicación, la teoría se ha comprobado repetidas veces en experimentos de laboratorio y en la actualidad es aceptada casi unánimemente por los físicos. Entre las predicciones más espectaculares de la teoría se cuenta la existencia de antimateria y los viajes en el tiempo, la elasticidad del espacio y del tiempo, la

equivalencia de la masa y la energía y la aniquilación de la materia. Como ampliación de su trabajo de 1905, Einstein publicó en 1915 la llamada teoría general de la relatividad. Aunque no tan bien fundada experimentalmente, sus predicciones son igual de fantásticas: espacio y tiempo curvos, agujeros negros, la posibilidad de un universo finito pero ilimitado, e incluso la posibilidad de que el tiempo y el espacio se disuelvan en la inexistencia.

La teoría de la relatividad se aventura en estas extraordinarias posibilidades adoptando una perspectiva radicalmente nueva sobre qué es exactamente el mundo. Según las ideas de Newton, que son la perspectiva de sentido común que adopta la gente normal en la vida cotidiana, el mundo cambia a cada momento. En cualquier momento dado, el mundo supone un estado determinado (aunque no por completo conocido) de todo el universo. Inevitablemente pensamos en todas las demás personas, en todos los demás planetas y estrellas, en las otras galaxias, en todas las cosas que nos interesan, y las imaginamos en determinadas condiciones concretas en este momento, es decir, ahora. El mundo, pues, se ve como la totalidad de todos estos objetos en un momento concreto. La mayor parte de la gente no duda de la existencia de un «mismo momento» universal (ni tampoco lo dudaba Newton).

La defunción de esta habitual manera de concebir el tiempo la pone de manifiesto un curioso fenómeno. Entre las constelaciones de Águila y de Sagitario hay un prodigioso objeto astronómico denominado un púlsar binario. En apariencia, consiste en dos

estrellas derrumbadas o colapsadas que orbitan una alrededor de la otra a muy corta distancia. Se cree que estas estrellas son tan compactas que incluso sus átomos se han desplomado en forma de neutrones por obra de su propio peso debido a la enorme gravedad. A resultas de la gran densidad —las estrellas tienen unos pocos kilómetros de diámetro— giran a la formidable velocidad de varias veces por segundo. Una de las estrellas está sin duda rodeada por un campo magnético, pues cada vez que gira emite una pulsación de ondas de radio (de donde el nombre de púlsar), y durante los últimos cinco años los astrónomos han estado controlando estas vibraciones con el gigantesco radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico. La regularidad de la rotación de la estrella de neutrones se refleja en la exacta regularidad de las emisiones, que en consecuencia pueden utilizarse como un reloj estelar preciso, al mismo tiempo que permite seguir el movimiento de la estrella.

La regularidad de las pulsaciones proporciona un ejemplo gráfico de la imperfección del tiempo de sentido común. Al ser tan masivas y estar tan juntas, las dos estrellas de neutrones bailan la una alrededor de la otra a una velocidad fenomenal, tardando únicamente ocho horas en cada revolución orbital: un año de ocho horas. Por tanto, el púlsar se mueve a una considerable fracción de la velocidad de la luz, que es la misma que la velocidad de las pulsaciones de radio. (La luz, las ondas de radio y otras radiaciones, como el calor infrarrojo, los rayos ultravioleta, los rayos X y los gamma son ejemplos del mismo fenómeno básico: las ondas

electromagnéticas). Al girar el púlsar alrededor de su compañero, a veces se acerca a la Tierra y a veces se aleja, según la dirección momentánea del movimiento. El sentido común pensaría que cuando el púlsar se acerca, las pulsaciones de radio se aceleran, puesto que reciben el empuje adicional, en dirección a nosotros, del propio movimiento de la estrella, como lanzada por una honda. Por la misma razón las pulsaciones deberían desacelerarse al retroceder la estrella. De ser así, la primera serie de pulsaciones debería llegar mucho antes que la segunda, puesto que recorrerían la enorme distancia que las separa de la Tierra a mayor velocidad. En realidad, la recepción de las pulsaciones de toda la órbita debería extenderse por un intervalo de muchos años, entremezclándose pues las pulsaciones de miles de órbitas en una complicada maraña. Sin embargo, la observación muestra algo absolutamente distinto: desde todas las posiciones orbitales llega una pauta regular de pulsaciones limpiamente dispuestas en correcto orden.

La conclusión parece enigmática: no hay pulsaciones rápidas que adelanten a las pulsaciones lentas.

Todas llegan a la misma velocidad, espaciadas entre sí de manera regular. Esto parece estar en flagrante contradicción con el hecho de que el púlsar se esté moviendo, y una vivida demostración de la contradicción la proporciona el hecho de que las pulsaciones que llegan a velocidad inalterada también transportan información directa de que el púlsar se mueve a gran velocidad. La información en cuestión va codificada en las características de las mismas ondas

de radio, que tienen mayor frecuencia cuando el púlsar está retrocediendo que cuando se está acercando. Esta variación de la frecuencia, similar al cambio del ruido de un motor cuando un automóvil acelera, la utilizan los radares de la policía para medir la velocidad de los coches. La misma técnica demuestra que el púlsar va disparado por el espacio, y sin embargo sus pulsaciones alcanzan la Tierra a una velocidad constante.

Hace un siglo, observaciones como ésta hubieran causado consternación, pero hoy se cuenta con ellas. Ya en 1905, Einstein predijo tales efectos basándose en su teoría de la relatividad. Una combinación de teoría matemática y de experimentación condujo a Einstein a una notable —y en realidad difícilmente creíble— conclusión: la velocidad de la luz es la misma en todas partes y para todos los cuerpos, y esto es así independientemente de la velocidad a la que se muevan. En aquellos días, las razones que respaldaban su críptica afirmación se referían a las propiedades de las partículas eléctricas en movimiento y a la incapacidad de los físicos para medir la velocidad de la Tierra utilizando señales luminosas. No nos detendremos aquí en los detalles técnicos, salvo para decir que la velocidad de la Tierra resultó carecer por completo de sentido, puesto que sólo los movimientos relativos (de donde el apelativo de relatividad) se pueden medir. En lugar de eso, concentrémonos en la significación y las consecuencias de la fructífera afirmación de Einstein.

Si un objeto retrocede con respecto a nosotros y comenzamos a

perseguirlo, es de esperar que esta maniobra tenga como resultado disminuir la rapidez con que retrocede. De hecho, si se pone el bastante empeño en la persecución, incluso es posible llegar a coger el objeto. De manera que la velocidad relativa entre uno y el objeto depende claramente del propio estado de movimiento. No obstante, si el objeto es una pulsación luminosa, no ocurre lo mismo. Aunque pueda parecer increíble, cualquiera que sea el empeño que se ponga en perseguirla nunca se ganará ni un kilómetro por hora a la pulsación luminosa. En verdad, la luz se mueve muy de prisa (300.000 kilómetros por segundo), pero incluso si viajáramos en un cohete al 99,9 por ciento de la velocidad de la luz, nunca se conseguiría disminuir la velocidad a la que se aparta de nosotros, por potentes que fueran los motores del cohete.

Estas afirmaciones probablemente parezcan puro sinsentido. Si alguien que permaneciera en la Tierra observara la persecución y viera la onda luminosa alejándose a 300.000 kilómetros por segundo y al cohete persiguiéndola a una velocidad casi igual, debería ver la distancia que los separa ensancharse a tan sólo una fracción de la velocidad de la luz. Sin embargo, de aceptar la propuesta de Einstein (y los experimentos confirman que es correcta), el individuo situado en el cohete vería la misma onda luminosa alejarse de él 300.000 kilómetros por segundo.

La única manera de reconciliar estas observaciones aparentemente contradictorias es suponer que, desde el cohete, el mundo se ve y se comporta de muy distinto modo que visto desde la Tierra.

Una sorprendente demostración de esta diferencia aparece si el astronauta hace un experimento con ondas luminosas dentro de la cabina espacial en el momento en que pasa por encima de sus colegas situados en la Tierra (Figura 4). En este momento se las arregla para lanzar dos impulsos de luz en direcciones contrarias desde el centro exacto del cohete, una hacia adelante y otra hacia atrás. Naturalmente, él ve cómo ambos impulsos alcanzan los extremos opuestos del cohete simultáneamente. Recuérdese que la inmensa velocidad hacia adelante del cohete, con respecto a la Tierra, no tiene ninguna clase de efectos sobre la velocidad de los impulsos luminosos tal como se observan desde el cohete. No obstante, estos hechos tal y como se presencian desde la Tierra no pueden ser los mismos.

Durante el breve intervalo de tiempo que tardan las ondas en recorrer la longitud del cohete, el propio cohete avanza hacia adelante ostensiblemente. El observador situado en la Tierra también ve que los dos impulsos se mueven a la misma velocidad respecto a él, pero desde su marco de referencias el cohete está en movimiento: el extremo frontal del cohete parece retroceder con relación al impulso luminoso y el extremo trasero parece avanzar a su encuentro. El resultado inevitable es que el impulso dirigido hacia atrás llega antes. Ambos acontecimientos no son simultáneos según se observa desde la Tierra, pero sí lo son cuando se ven desde el cohete.

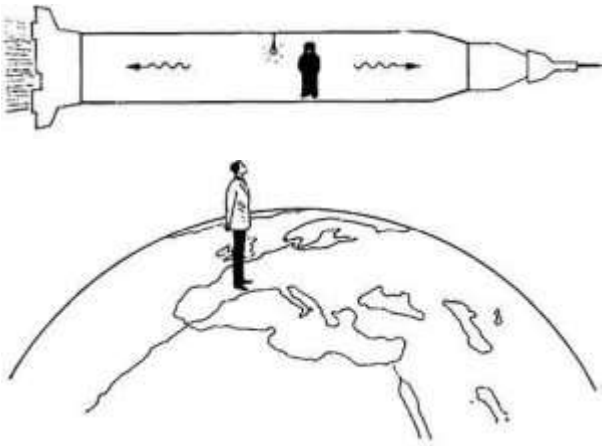

Figura 4. No hay presente universal. Esta sorprendente conclusión se deduce del peculiar comportamiento de los impulsos luminosos. En la nave espacial, los impulsos chocan simultáneamente contra las mamparas de los extremos debido a que se mueven a la misma velocidad (desde el punto de vista del cohete) a partir del centro de la nave. Sin embargo, vistos desde la Tierra, los impulsos también parecen desplazarse a la misma velocidad, de modo que el de la izquierda llega antes, puesto que la mampara trasera avanza a su encuentro mientras que la delantera retrocede.

¿Cuál de las dos versiones es la correcta? La respuesta es que ambas son correctas. El concepto de simultaneidad —el mismo momento en dos lugares distintos— no tiene significación universal. Lo que un observador considera el ahora puede estar en el pasado o en el futuro según la determinación de otro. A primera vista tal conclusión parece alarmante. Si el presente de una persona es el pasado de otra persona y aún el futuro de una tercera, ¿no podrían hacerse señales entre sí y permitir la predicción del futuro? ¿Qué

ocurriría entonces si el observador una vez informado actuara para cambiar ese futuro ya observado? Por suerte para la coherencia de la física, no parece que esta situación pueda presentarse. Por ejemplo, en el caso del experimento del cohete, los observadores sólo pueden saber que los impulsos luminosos han llegado cuando reciben alguna clase de mensaje. Pero el mensaje necesita un determinado tiempo para desplazarse. Para derrotar a la causalidad y convertir el futuro en pasado (o viceversa), evidentemente este mensaje debería desplazarse a mayor velocidad que la luz utilizada en el experimento. Pero, por lo que parece, no hay nada que pueda moverse a mayor velocidad que la luz. Si lo hubiese, entonces la estructura causal del mundo quedaría amenazada. Así pues, vemos que pasado y futuro no son en realidad conceptos universales, sino que sólo sirven para acontecimientos que puedan ponerse en conexión mediante señales luminosas. Podríamos preguntarnos por qué no puede ocurrir, sencillamente, que un cohete vaya progresivamente acelerando y, por tanto, pueda observarse desde la Tierra que atrapa a la luz. Einstein demostró que eso es imposible. Conforme se aproxima a la barrera de la luz, el cohete y sus ocupantes comienzan a hacerse cada vez más pesados. Cada vez es necesaria una mayor cantidad de energía para superar la inercia adicional y poder ir más rápido.

El aumento de velocidad disminuye regularmente y nunca se alcanza la velocidad de la luz, por mucho que se insista. Naturalmente, el astronauta no se ve a sí mismo ganando peso; en

lugar de eso, el mundo que lo rodea aparece extrañamente distorsionado. Hablando en términos simplistas, las distancias en el sentido del avance parecen contraerse. En consecuencia, visto desde el cohete, el astronauta sí que parece estar yendo cada vez más de prisa, puesto que parece tener menos distancia que recorrer en un tiempo dado.

Un astronauta en un cohete que se moviera al 99,9 por ciento de la velocidad de la luz, vería el Sol a sólo seis millones de kilómetros de la Tierra y lo alcanzaría en únicamente 22 segundos.

Aunque parezca increíble, los observadores situados en la Tierra, que no percibirían tal contracción, medirían la distancia al Sol en 150 millones de kilómetros y la duración de este viaje muy largo sería de más de ocho minutos. La conclusión parece ser que el tiempo, según se percibe desde el cohete, avanzaría a una lentitud veintidós veces mayor que en la Tierra. La verdadera sorpresa, empero, llega cuando el astronauta vuelve la mirada hacia la Tierra.

Si realmente los acontecimientos suceden en el cohete con veintidós veces más lentitud que en la Tierra, entonces podría parecer que si el astronauta mirase hacia la Tierra con un telescopio tendría que ver las cosas ocurriendo veintidós veces más de prisa que lo normal. En realidad, en lugar de ver acelerarse veintidós veces los acontecimientos, vería exactamente lo contrario: una Tierra a cámara lenta. Ambos observadores verían el tiempo del otro como transcurriendo con lentitud. Esta relación simétrica entre los observadores en movimiento se halla en el corazón de la teoría de la

relatividad, que sólo asigna significado al movimiento en relación con otros observadores. Por tanto, es imposible decir que el cohete se mueve y la Tierra permanece quieta, o viceversa, de manera que todo efecto presenciado por uno de ellos debe presenciarlo también el otro.

No existe ninguna incoherencia real en el hecho de que cada observador vea lentificarse el tiempo del otro si recordamos que están muy en desacuerdo sobre qué momento del marco de referencias del otro debe considerarse el correspondiente al presente. Sólo pueden comparar los tiempos mediante el dilatado proceso de enviarse señales entre sí, lo que al menos lleva el tiempo que tarda la luz en ir del uno al otro.

La realidad del efecto de dilatación del tiempo se pone de manifiesto si el cohete regresa a la Tierra y se comparan directamente los relojes de la Tierra con los del cohete. El asombroso descubrimiento es que los dos tiempos de los observadores han estado en todo momento desacompasados. Lo que puede haber sido un viaje de pocas horas para el astronauta, habrá supuesto días en el tiempo terráqueo. Tampoco se trata de un extraño efecto fisiológico: el cohete sólo habrá percibido unas pocas horas de duración en los varios días transcurridos en la Tierra.

La idea del tiempo elástico dio lugar a un verdadero escándalo cuando Einstein la dio a conocer en 1905, pero desde entonces muchos experimentos han confirmado su realidad. El más preciso de estos experimentos utiliza partículas subatómicas porque son

muy fáciles de acelerar hasta cerca de la velocidad de la luz y suelen llevar un reloj incorporado. Se pueden crear mesones mu o, dicho en breve, muones en las colisiones subatómicas controladas, que tienen una vida de unos dos microsegundos antes de desintegrarse en partículas materiales más conocidas, como los electrones. Cuando se mueven a cerca de la velocidad de la luz, la dilatación del tiempo aumenta su vida, según nuestras mediciones, varias veces. Por supuesto, dentro de su propio marco de referencias siguen durando dos microsegundos.

Una buena comprobación del efecto se realizó en el laboratorio acelerador de partículas del CERN (Ginebra) a comienzos de 1977, cuando se creó un rayo de muones a alta velocidad y se colocó dentro de un anillo magnético, de tal forma que se pudiera medir su duración. El experimento confirmó la cifra de dilatación temporal prevista por la teoría de la relatividad con una exactitud del 0,2 por ciento.

Una posibilidad sugestiva que abre el efecto de dilatación del tiempo es el viaje en el tiempo.

Conforme se acerca a la velocidad de la luz, la escala temporal del astronauta se distorsiona cada vez más con respecto al universo. Por ejemplo, lanzado a un centenar de kilómetros por hora menos que la velocidad de la luz, podría realizar un viaje a la estrella más próxima (a más de cuatro años luz de distancia) en menos de un día, aunque el mismo viaje, medido desde la Tierra, supondría más de cuatro años. El ritmo de su reloj viene a ser unas 1800 veces

más lento cuando se observa desde la Tierra que cuando se observa desde el interior del cohete. A una milla por hora por debajo de la velocidad de la luz, la dilatación temporal es de 18.000 veces y el viaje, visto desde el cohete, parece un trayecto de autobús, aunque sigue durando varios años desde el punto de vista de la Tierra. ¡A esta colosal velocidad, el astronauta podría rodear toda la galaxia en pocos años (en tiempo del cohete) y regresar a la Tierra para encontrarse en el siglo cuatro mil! Aunque las hazañas de tales viajes deben quedar definitivamente en el reino de la ciencia-ficción (consumirían una cantidad de energía suficiente para alimentar toda nuestra tecnología actual durante millones de años), la dilatación del tiempo constituye un hecho científico comprobado.

El objeto de mencionar estos extraordinarios efectos es subrayar que las nociones de espacio y de tiempo no son como las piensa la mayor parte de la gente. El elemento esencial que ha inyectado en la física la teoría de la relatividad es la subjetividad. Las cosas fundamentales, como la duración, la longitud, el pasado, el presente y el futuro, ya no pueden considerarse un marco sólido dentro del cual vivimos nuestra vida. Por el contrario, son cualidades elásticas y flexibles, y sus valores dependen precisamente de quién los mida. En este sentido, el observador comienza a desempeñar un papel bastante central en la naturaleza del mundo. Ha perdido todo sentido preguntar qué reloj es el que va realmente bien o cuál es la distancia real entre dos lugares o qué es lo que ocurre en Marte ahora. No existen duración, extensión ni presente común reales.

Al principio de este capítulo veíamos que la relatividad adopta una perspectiva absolutamente nueva con respecto a lo que «en realidad» es el mundo. En la vieja imagen newtoniana, el universo consiste en una colección de «cosas», localizadas aquí y en otros lugares en este momento. La relatividad, por su parte, revela que las cosas no siempre son lo que parecen, mientras que los lugares y los momentos están sometidos a reinterpretación. La imagen relativista de la realidad es un mundo compuesto de acontecimientos y no de cosas. Los acontecimientos son puntos en el espacio y el tiempo, sin extensión ni duración: las cinco en punto en el centro exacto de Piccadilly Circus es un acontecimiento (aunque probablemente muy poco interesante). Los acontecimientos cuentan con la universal aquiescencia de todos los observadores, aunque por lo general habrá desacuerdo sobre cómo o cuándo ocurren los acontecimientos.

A pesar de la relatividad de lo que se consideraban formalmente cualidades absolutas y concretas, queda todavía alguna clase de organización espacio-temporal acorde con el sentido común. Por ejemplo, las discrepancias entre el «momento presente» interpretado por diversos observadores y el alargamiento elástico del tiempo no pueden ser tan violentas que en realidad lancen el pasado en el futuro de tal forma que pueda verlo un mismo observador. Es decir que, aunque algunos acontecimientos pueden ser considerados pasados para un observador, futuros para otro y presentes para un tercero, la secuencia de dos acontecimientos causalmente

conectados siempre será presenciada en el mismo orden. Si el disparo de la pistola destruye el blanco, entonces ningún observador, cualquiera que sea su estado de movilidad, verá destrozarse el blanco antes de que dispare la pistola.

Empero, la correcta relación causal sólo se mantiene debido a la norma de que los observadores no pueden superar la barrera de la luz y desplazarse a mayor velocidad.

Si esto fuera posible, causa y efecto podrían intercambiarse y el astronauta retrocedería en el tiempo lo mismo que penetraría en el futuro. Entonces nos encontraríamos con un sino similar al de la señorita Brillo, que

viajaba mucho más de prisa que la luz.
Un día se marchó, de manera relativa,
y regresó la noche anterior.

El caos causal que surgiría de visitar el propio pasado parece ser únicamente una posibilidad novelesca.

En un mundo de cambiantes perspectivas espacio-temporales, se precisa un nuevo lenguaje y una nueva geometría que tenga en cuenta al observador de manera fundamental. Los conceptos newtonianos del tiempo y el espacio eran extensiones naturales de nuestras experiencias cotidianas. La teoría de la relatividad, por su parte, exige algo más abstracto, pero también, creen muchos, más elegante y revelador. En 1908, Hermann Minkowski señaló que efectos peculiares como la contracción del tamaño y la dilatación del

tiempo no parecerían tan antinaturales si dejáramos de pensar en el espacio y en el tiempo y, en su lugar, pensáramos en el espacio-tiempo. No se trata de una mera monstruosidad cuatridimensional inventada por los matemáticos para confundir a la gente, sino de un modelo del mundo mucho más exacto y de hecho más simple que el de Newton. Su sentido resulta visible en ejemplos sencillos como la extensión espaciotemporal del cuerpo humano. Es obvio que éste tiene una extensión en el espacio (de alrededor de 1,80 cm) y una duración en el tiempo (de unos setenta años), de manera que tiene extensión en el espacio-tiempo. Lo que hace que esta afirmación sea algo más que una perogrullada es que las dos extensiones, la espacial y la temporal, no son independientes. Lo cual no quiere decir que las personas altas vivan más tiempo ni nada por el estilo, sino que, visto desde un cohete situado sobre la Tierra, el hombre podría parecer que mide un metro y que vive ciento cuarenta años. Una manera elegante de considerar lo anterior es pensar que el tamaño físico y la duración de la vida son meras proyecciones en el espacio y en el tiempo, respectivamente, de la más fundamental extensión espaciotemporal. Como siempre ocurre con las proyecciones, la extensión de la imagen depende del ángulo con respecto al objeto, lo cual sigue siendo cierto en el espacio-tiempo lo mismo que en el espacio. De donde resulta que los cambios de velocidad actúan de manera muy parecida a las rotaciones en el espacio-tiempo; concretamente, al alterar la propia velocidad, estamos girando nuestro cuerpo cuatridimensional alejándolo del

espacio y acercándolo al tiempo, o viceversa. Así pues, la extensión espaciotemporal del terrícola se mantiene inalterada cuando se ve desde un cohete: ¡tiene sencillamente noventa centímetros de la longitud de su cuerpo convertidos en setenta años de vida!

Haciendo algunos números se descubre que una pequeña longitud temporal vale por una enorme cantidad de distancia. No será tampoco sorprendente, teniendo en cuenta su papel fundamental en la teoría, que la velocidad de la luz actúe como factor de conversión. Por tanto, un año de tiempo corresponde a un año luz (unos diez billones de kilómetros) de espacio; un pie (30 centímetros) resulta aproximadamente en un nanosegundo (una mil millonésima de segundo).

El espacio-tiempo es algo más que una forma cómoda de visualizar la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud. Para el relativista, el mundo es espacio-tiempo, y ya no piensa en objetos que se mueven en el tiempo, sino que se extienden por el espacio-tiempo. Dado que no pueden dibujarse las cuatro dimensiones sobre una hoja de papel, sólo se muestran dos dimensiones del espacio; el tiempo discurre verticalmente hacia arriba y el espacio horizontalmente. La línea serpenteante muestra la trayectoria de un cuerpo en movimiento. Para no recargar el diagrama, se ha reducido la extensión espacial del cuerpo de modo que se representa con una línea en lugar de con un tubo.

Si el cuerpo permanece en reposo, la línea será recta y vertical. Cuando se acelera, la línea se curva. La partícula primero se mueve

brevemente hacia la derecha para volver hacia atrás, luego más hacia la derecha, para disminuir la velocidad y regresar al estado anterior. Estos trayectos en el espacio-tiempo se llaman líneas de universo y representan la historia completa del sistema de objetos.

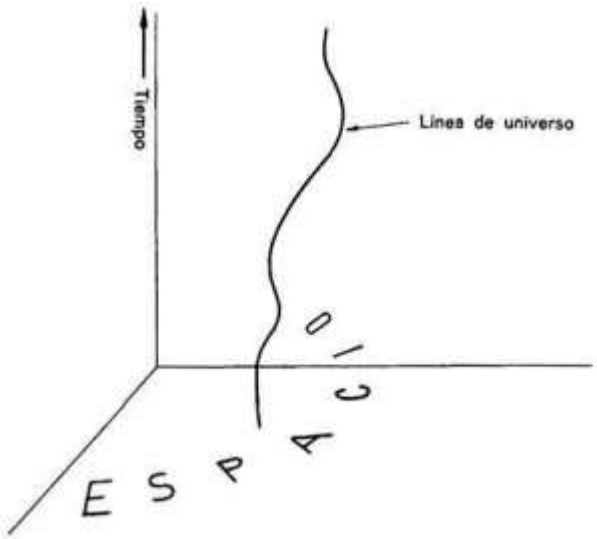

Figura 5. Diagrama del espacio-tiempo. La historia de un cuerpo se representa mediante un trayecto o "línea de universo" que surca el espacio-tiempo.

Si el diagrama se ampliara hasta abarcar todo el espacio-tiempo (todo el universo durante toda la eternidad), sería una imagen de la totalidad de los acontecimientos y contendría todo lo que la física puede decir del mundo. Volviendo a la espinosa cuestión de qué es realmente el mundo, vemos que para un relativista es espacio-tiempo y líneas de universo. Según esta imagen del universo, el pasado y el futuro son tan absolutamente reales como el presente; de hecho, no es posible hacer ninguna distinción universal entre

pasado, presente y futuro. De donde se deduce que las cosas no ocurren en el espacio-tiempo, sino que simplemente «son».

¿Cómo hemos de reconciliar el carácter estático, de una vez por todas, del universo relativista con el mundo de nuestra experiencia donde ocurren acontecimientos, las cosas cambian y nuestro medio ambiente evoluciona? Nosotros no percibimos el mundo como una plancha de espacio-tiempo surcada de líneas, de manera que ¿qué es lo que falla?

Nuestra percepción real del tiempo parece diferenciarse en dos aspectos esenciales del modelo del tiempo tal como lo concibe esta teoría. El primero es la aparente existencia de un ahora o instante presente. El segundo es el flujo o movimiento del tiempo desde el pasado hacia el futuro. Comencemos por examinar qué es lo que se entiende por «ahora». El presente desempeña dos papeles; separa el pasado del futuro y proporciona el filo con que nuestra conciencia se abre paso por el tiempo desde el pasado hacia el futuro. Como la proa de un barco, el presente arrastra tras de sí una estela de sucesos y experiencias recordados, mientras delante están las aguas desconocidas. Estas observaciones parecen tan naturales como para estar por encima de toda sospecha, pero un atento examen pone de manifiesto varios fallos. Desde luego, no puede existir el presente porque cada momento del tiempo es el momento presente «cuando ocurre». Lo que quiere decir que hay ahoras pasados, ahoras futuros y ahora. Pero al no haber ninguna cualidad externa con la que calibrarlo, muy poco puede decirse sobre el presente que no sea

tautológico.

Una analogía popular es considerar al observador como una línea de universo en el espacio-tiempo, dotada de una lucecita. La luz se mueve ascendiendo lenta y regularmente por la línea conforme el observador toma conciencia de los sucesivos momentos posteriores. No obstante, este artilugio es un verdadero fraude, puesto que utiliza la idea de movimiento en el tiempo y, en cuanto tal, intuitivamente, implica otro tiempo, externo al espacio-tiempo, en relación con el cual se miden sus progresos. Todo esto parece conllevar que «ahora» no es más que otra manera de etiquetar los instantes y que hay tantos ahoras como instantes. Ya hemos visto que «ahora» no es, de ninguna manera, una caracterización universal y que distintos observadores discreparían sobre cuáles acontecimientos son o no son simultáneos, pero parece ser que, incluso para un único observador, la noción del presente no tiene demasiado sentido.

Idéntico cenagal de contradicciones y tautologías se presenta al examinar la idea del flujo del tiempo. Tenemos la profunda sensación psicológica de que el tiempo avanza del pasado hacia el futuro, según un progreso que borra el pasado de nuestra existencia y da lugar al futuro. En la literatura pueden encontrarse muchos ejemplos que describen esta sensación: el río del tiempo, el tiempo que corre, el tiempo que vuela, el tiempo por venir, el tiempo ido, el tiempo que no espera a nadie... San Agustín lo veía de este modo:

El tiempo es como un río compuesto de los acontecimientos que

ocurren y su corriente es fuerte; tan pronto algo aparece, ya ha sido arrastrado.

Tan fuerte es esta sensación cinética que si hay un candidato a ser nuestra vivencia más fundamental éste es el tiempo como actividad. Pero, ¿dónde está el río en nuestro diagrama espaciotemporal?

Si el tiempo fluye, ¿a qué velocidad avanza? Un segundo por segundo, un día por día: la pregunta carece de sentido. Cuando observamos un objeto que se mueve por el espacio utilizamos el tiempo para medir la velocidad a la que pasa, pero ¿qué se puede utilizar para medir la velocidad con que pasa el propio tiempo? Sería asombrosa la pregunta: ¿pasa el tiempo? Sin embargo, nada que objetivamente pueda medirlo en el mundo que nos rodea demuestra que pase. No hay ningún instrumento que pueda recoger el flujo del tiempo ni medir la velocidad a que avanza. Es un error general creer que ésa es precisamente la función del reloj. Pues el reloj mide los intervalos del tiempo, no la velocidad del tiempo, una diferencia que es análoga a la diferencia que hay entre una regla y un velocímetro. El mundo objetivo es el espacio-tiempo, que incluye todos los acontecimientos de todos los tiempos. No hay presente, pasado ni futuro.

Una de las fascinaciones del tiempo es la gran disparidad entre nuestra percepción como observadores conscientes y sus propiedades físicas objetivas. No podemos eludir la conclusión de que las cualidades del tiempo que nosotros consideramos más vitales —la división en pasado, presente y futuro, y el movimiento

hacia adelante de cada una de estas divisiones— son puramente subjetivas. Es nuestra propia existencia la que otorga al tiempo vida y movimiento.

En un mundo sin observadores conscientes, el río del tiempo dejaría de fluir. A veces el flujo del tiempo se atribuye a una ilusión fruto de una confusión profundamente enraizada en la estructura temporal de nuestro lenguaje. Posiblemente, una inteligencia extraterrestre sería absolutamente incapaz de comprender la idea misma.

Por otra parte, la confusión de nuestro lenguaje (que indudablemente existe) bien puede ser el resultado de la antes mencionada incompatibilidad entre el tiempo objetivo y el subjetivo. Es decir, puede ser que nuestra sensación de un tiempo que fluye no sea el resultado del barullo del lenguaje y del pensamiento, sino viceversa: un intento de utilizar el vocabulario enraizado en nuestra fundamental vivencia psicológica del tiempo para describir el mundo físico objetivo. Quizás existan «realmente» dos tipos de tiempo —el psicológico y el objetivo— y debamos desarrollar dos modos de descripción para hablar de ellos.

He escrito «realmente» entre comillas porque la cuestión de qué se entiende aquí por «real» es importante. Muchas personas defenderían que la verdadera realidad debe ser independiente de la conciencia del observador, de manera que al tiempo subjetivo o psicológico, por su misma naturaleza individual, no puede atribuírsele la dignidad de «real». Sin embargo, esta experiencia individual parece ser que la comparten todos los observadores

conscientes que pueden comunicarse entre sí, de modo que quizá sea tan real como el hambre, la lujuria y los celos.

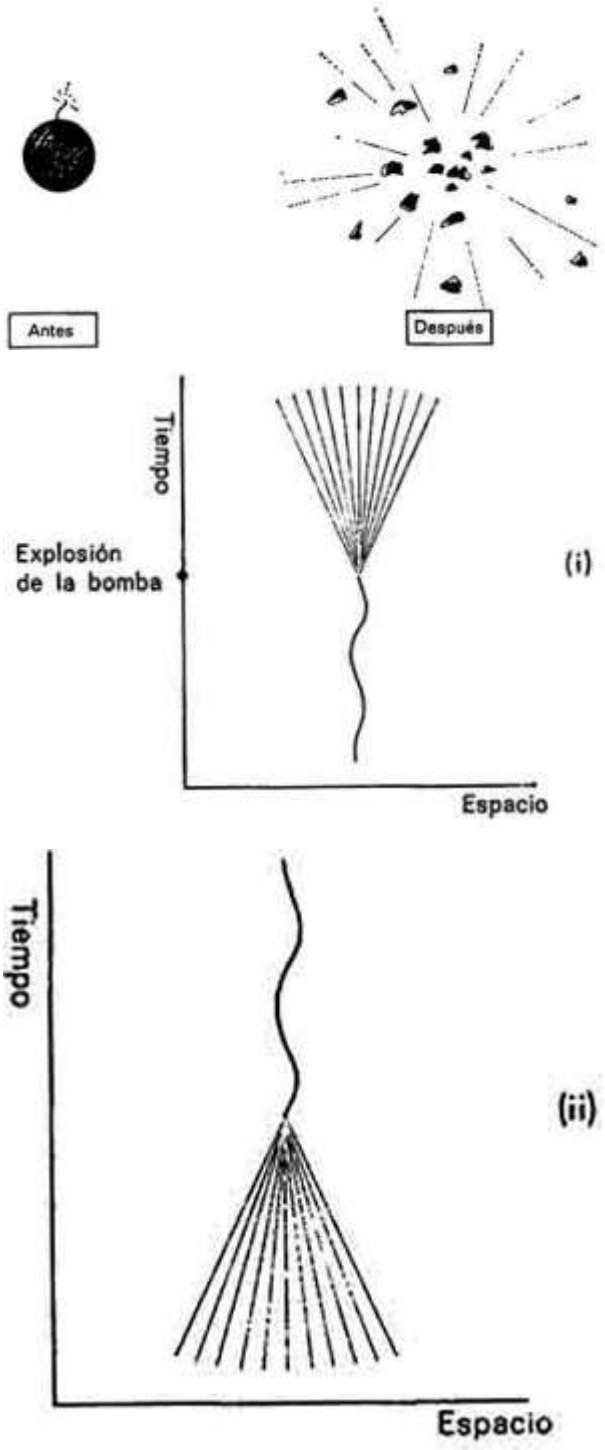

Figura 6. ¿En qué se diferencia el pasado del futuro? El desorden determina la dirección del tiempo, como ilustra la fragmentación de una bomba. En el diagrama del espacio-tiempo de este proceso, (i) la asimetría entre pasado y futuro se pone de manifiesto en la ramificación de las líneas del mundo. La imagen invertida (ii) que representa la conjunción espontánea de los fragmentos reconstituyendo la bomba puede considerarse milagrosa.

No debemos suponer que en el espacio-tiempo objetivo desaparece todo vestigio de pasado-futuro. Sin duda se puede determinar qué hechos concretos se sitúan en el pasado o en el futuro de otros, y comprobar esta relación con los instrumentos de laboratorio. Nuestro diagrama del espacio-tiempo tiene un arriba (futuro) y un abajo (pasado) bien definidos y asimétricamente relacionados entre sí, como demostrará un sencillo ejemplo. La Figura 6 representa una bomba que explota en diversos fragmentos. Es un típico ejemplo de un cambio de tiempo asimétrico, porque es irreversible: la película cinematográfica de la explosión pasada al revés inmediatamente delataría la trampa porque mostraría la milagrosa auto organización de los fragmentos en un sistema bien ordenado. Del mismo modo, al invertir el diagrama (i) se produce la misma secuencia imposible. El mundo está repleto de influencias perturbadoras como ésta que proporcionan una diferenciación material y objetiva entre el pasado y el futuro. No obstante, no definen el pasado ni el futuro. La distinción es la misma que la

asimetría entre la mano izquierda y la derecha: la Tierra rota en sentido contrario a las agujas del reloj en el Polo Norte, de manera que siempre va hacia la izquierda, por así decirlo, lo que aporta una auténtica distinción entre izquierda y derecha. Sin embargo, sabemos que es absurdo preguntar qué parte de la Tierra está más a la izquierda y qué país se sitúa a mitad de camino entre la derecha y la izquierda.

Derecha e izquierda definen direcciones, no lugares. Del mismo modo, pasado y futuro definen direcciones temporales y no momentos. Las direcciones en o a través del tiempo tienen objetivamente significado, pero no el calificar los acontecimientos de pasados o futuros. En el capítulo 10 se examinará con mayor atención la naturaleza del tiempo y nuestras percepciones del mismo. La contraposición entre el tiempo físico y nuestra vivencia del tiempo subraya el fundamental papel que juega la conciencia del observador en la organización de nuestras percepciones del mundo.

En la antigua visión newtoniana, el observador no parecía desempeñar ningún papel importante: el mecanismo de relojería iba dando vueltas adelante, por completo indiferente a si alguien o a quién lo observaba. La visión del relativista es diferente. Las relaciones entre acontecimientos tales como el pasado y el futuro, la simultaneidad, la longitud y el intervalo resultan estar en función de la persona que los percibe, y sensaciones tan entrañables como el presente y el paso del tiempo se desvanecen por completo del mundo «exterior» para alojarse exclusivamente en nuestra

conciencia. La división entre lo real y lo subjetivo ya no aparece tan claramente trazada y uno comienza a albergar sospechas de que la entera idea de un «mundo real exterior» puede desmoronarse por completo. Los capítulos posteriores mostrarán cómo la teoría cuántica exige la incorporación del observador al mundo físico de una forma aún más esencial.

La teoría de la relatividad que expuso Einstein en 1905 trastocó muchas concepciones sobre el espacio, el tiempo y el movimiento, pero sólo fue el principio. En 1915 publicó una teoría ampliada —la llamada teoría de la relatividad general— en la que proponía posibilidades aún más extraordinarias. Hemos visto que el espacio y el tiempo no son fijos, sino en cierto sentido elásticos; pueden ensancharse y encogerse según quién los observe. A pesar de esto, el espacio-tiempo, la síntesis cuatridimensional del espacio y del tiempo, se suponía rígido. En 1915, Einstein planteó que el propio espacio-tiempo era elástico, de modo que podía estirarse, doblarse, retorcerse y cerrarse. Así pues, en lugar de limitarse a proporcionar el escenario donde los cuerpos materiales representan sus papeles, el espacio-tiempo es en realidad uno de los actores. Naturalmente, no nos resulta fácil visualizar cómo es una curvatura en cuatro dimensiones, pero matemáticamente una curvatura en cuatro dimensiones no es más especial que una línea curva (una dimensión) o una superficie curva (dos dimensiones).

Como todas las verdaderas teorías físicas, la relatividad general no se limita a predecir que el espacio-tiempo puede distorsionarse, sino

que aporta un conjunto explícito de ecuaciones que nos dicen cuándo, cómo y cuánto. El origen de la curvatura del espacio-tiempo es la materia y la energía, y las llamadas ecuaciones de campo de Einstein permiten calcular cuánta curvatura hay en un punto del espacio dentro y alrededor de una distribución dada de materia y energía. Como cabía esperar, la curvatura del espacio-tiempo tiene profundas consecuencias sobre las líneas universales de materia que lo atraviesan.

Al curvarse el espacio-tiempo, las líneas de universo se curvan con él, y surge el problema de qué efectos físicos experimentaría un cuerpo a resultas de esta reordenación de su línea de universo. Se ha explicado, que la curvatura de la línea de universo corresponde a la aceleración del cuerpo representado por la línea, de modo que el efecto de la curvatura del espacio-tiempo consiste en alterar los movimientos de los cuerpos en él situados. Por regla general consideramos que toda alteración del movimiento está causada por alguna fuerza, de tal modo que la curvatura manifiesta de por sí la presencia de alguna clase de fuerza. Puesto que todos los cuerpos, sea cual sea su masa o estructura interna, sufrirán igual distorsión, esta fuerza debe tener la propiedad distintiva de afectar indiscriminadamente a toda la materia sin tener en cuenta su naturaleza. La fuerza física que tiene exactamente estas características la conocemos todos: la gravedad.

Tal como descubrió Galileo y desde entonces se ha confirmado con extraordinaria exactitud, todos los objetos son acelerados a la

misma velocidad por la gravedad, cualquiera que sea su masa o constitución, lo que implica que la gravedad es más bien una propiedad del espacio envolvente que de los cuerpos que lo recorren. En palabras de John Wheeler, el físico norteamericano que ha hecho progresar enormemente la teoría de la relatividad, la materia recibe sus «órdenes de movimiento» directamente del mismo espacio, de tal modo que, más que considerar la gravedad como una fuerza, debería verse como una geometría. Así pues, «el espacio dice a la materia cómo debe moverse y la materia dice al espacio cómo debe curvarse». La relatividad general es, por tanto, una explicación de la gravedad como distorsión de la geometría del espacio-tiempo.

Cierto número de famosos experimentos han medido la distorsión del espacio-tiempo en el sistema solar. Se sabía desde hace mucho que el planeta Mercurio sufría misteriosas perturbaciones en su movimiento: dicho sencillamente, su órbita se desplaza cuarenta y tres segundos del arco cada siglo.

Aunque mínimo, un desplazamiento de esta magnitud era fácil de medir y la aplicación directa de la teoría de la gravedad de Newton no lo explicaba. Cuando se publicó, el artículo de Einstein predijo pequeñas correcciones en la teoría de Newton como consecuencia de la curvatura del espacio-tiempo, y éstas resultaron ser precisamente de cuarenta y tres segundos de arco por siglo en el caso de Mercurio.

Fue un gran triunfo, pero aún los habría mayores. En 1919, el astrónomo Sir Arthur Eddington comprobó la teoría del espacio-

tiempo curvo apuntando a las estrellas en la dirección del Sol durante un eclipse total (el eclipse permitió que las estrellas fueran visibles durante el día aun cuando se situaran en el cielo cerca del Sol).

Encontró, tal como estaba previsto, una pequeña pero constatable distorsión en sus posiciones cuando se contemplaban en las proximidades del Sol en comparación con sus posiciones cuando el Sol está en otra parte del firmamento. Por tanto, conforme el Sol se desplaza por el zodíaco curva la imagen que tenemos del telón de fondo estelar.

Una última y crucial comprobación de la teoría se realizó de la manera más elegante utilizando la gravedad de la Tierra. De acuerdo con la relatividad general, el tiempo se alarga o contrae por efecto de la gravedad del mismo modo que por un movimiento rápido.

Por tanto, los relojes situados en la superficie de la Tierra deben retrasarse con respecto a los relojes situados a mayor altitud, donde la gravedad es ligeramente inferior. El efecto es en realidad mínimo —una cien mil millonésima por ciento de reducción de la velocidad del reloj para cada kilómetro vertical—, pero es tal la precisión de la tecnología moderna que incluso esta diferencia puede detectarse. En 1959, los científicos de la Universidad de Harvard utilizaron las vibraciones internas naturales de un núcleo de hierro radiactivo. Un determinado isótopo del hierro se desintegra mediante la emisión de rayos gamma, que son fotones de luz con una frecuencia interna de

unos tres mil millones de megaciclos. Los rayos gamma eran disparados a lo largo de una torre vertical de 22,5 metros de altura, donde chocaban con nuevos núcleos de hierro. Normalmente, estos núcleos reabsorbían los rayos gamma, pero, dado que el tiempo «corría más de prisa» en lo alto de la torre, los rayos gamma se encontraban con que las vibraciones de los núcleos de hierro ya no se ajustaban a sus propias frecuencias, tal como ocurría en la base de la torre. Se inhibía, pues, la absorción. De este modo pudo medirse el alargamiento del tiempo debido a la gravedad de la Tierra.

Más recientemente, la distorsión del tiempo por la gravedad de la Tierra ha sido comprobada haciendo volar un máser de hidrógeno en un cohete espacial. Máser es la sigla en inglés de «amplificación de microondas mediante emisiones estimuladas de radiación», y es una versión del láser que hace oscilar frecuencias de radio de onda corta de una forma enormemente estable. Utilizando los ciclos del máser como marcapasos de reloj, los científicos controlaron el tiempo de la nave espacial en relación a la Tierra, comparando con máseres situados en el suelo. A diez mil kilómetros de altura, el tiempo debe aumentar en alrededor de la mitad de una mil millonésima parte en comparación con su velocidad en la superficie terrestre. Aunque mínimo, este significativo efecto fue constatado por los máseres y la teoría se confirmó. El tiempo corre realmente más de prisa en el espacio.

El efecto de alargamiento del tiempo resulta más llamativo a medida

que aumenta la gravedad. En la superficie de una estrella de neutrones, la disparidad entre la velocidad de un reloj situado en la superficie y otro situado a gran distancia llega a ser del uno por ciento. Las estrellas con masa algo superior a la de las estrellas de neutrones se habrán contraído aún más y su gravedad será todavía mayor. Si una estrella con una masa equivalente a la del Sol se contrajera hasta unos pocos kilómetros de diámetro, la distorsión del tiempo a su alrededor sería enorme. Además la estrella sería incapaz de resistir su propio peso y se desmoronaría violentamente, contrayéndose hasta convertirse en nada en un microsegundo. Su gravedad se volvería tan intensa que, en el espacio situado en las inmediaciones del objeto colapsado, el tiempo se lentificaría hasta literalmente detenerse en comparación con puntos alejados.

Un observador remoto deduciría que los relojes en esta superficie están completamente parados. En realidad le sería imposible ver los relojes, puesto que también estaría parada la salida de luz de la superficie. El agujero espacial dejado por el retraimiento de la estrella es pues negro: un agujero negro. Muchos astrónomos creen que los agujeros negros son el sino rutinario de las estrellas con una masa algo mayor que la de nuestro Sol.

Por supuesto, el observador que cayera en el agujero negro atravesando esta «superficie congelada» no vería el tiempo comportándose de manera anormal. En su marco de referencias, los acontecimientos ocurrirían con su habitual regularidad, de tal modo que su escala temporal se haría cada vez más discordante con la del

universo lejano. En el momento de alcanzar la superficie, lo que a él sólo le parecería la duración de unos microsegundos podría ser el paso de toda la eternidad y la desaparición del cosmos en otros lugares. La dislocación temporal crece sin límites, de tal modo que cuando por fin entrara en la región del agujero negro, estaría más allá del tiempo en lo que respecta al mundo exterior, una de cuyas consecuencias sería que nunca podría regresar del agujero negro a nuestro universo. Volver significaría retroceder en el tiempo, reapareciendo del agujero antes de haber caído en su interior.

Aunque está más allá de la eternidad, el interior del agujero negro es una región del espacio-tiempo muy parecida a cualquier otra por lo que se refiere a sus propiedades locales. Naturalmente, la intensidad de la gravedad hace que la caída del observador resulte un poco molesta, dado que los pies tratarán de caer a distinta velocidad que la cabeza, pero el paso del tiempo es absolutamente normal.

El problema del destino del observador es muy curioso. Cabe pensar que atraviese el agujero y emerja a otro universo completamente distinto, aunque los escasos datos de que disponemos indican que no ocurriría así. Si no puede regresar a nuestro universo, ni puede llegar a otro, ni puede evitar seguir cayendo dentro, ¿a dónde va? En el capítulo 5 veremos que está obligado a abandonar por completo el espacio-tiempo y dejar de existir en lo que se refiere al mundo físico conocido. Los agujeros negros también desempeñan un importante papel en los capítulos posteriores en relación con la

cuestión de si el universo es muy especial.

La introducción de la gravedad en la teoría de la relatividad socava, además, la concreción del mundo. El espacio-tiempo, en lugar de ser un mero terreno de juego, se vuelve ahora dinámico, con movilidad, cambio, curvatura y giro.

No podemos seguir adoptando la perspectiva newtoniana de tratar de comprender la evolución del mundo en el tiempo, sino que debemos tener en cuenta también los cambios del propio tejido del espacio-tiempo. El precio a pagar por disponer de un espacio-tiempo mutable es que éste, en realidad, puede ingeniárselas para disolverse en la inexistencia. Siguiendo un complicado movimiento que está íntimamente entretejido con las condiciones de la materia y la energía, las ecuaciones de Einstein predicen que son posibles situaciones (como las del centro de un agujero negro) donde el espacio-tiempo concentre su curvatura ilimitadamente. Con el aumento de la gravedad, la violenta distorsión del espacio-tiempo se hace cada vez mayor hasta que inevitablemente se desgarra por las costuras. Algunos astrónomos creen que esto es lo que le ocurrirá en último término a todo el universo: una catastrófica y suicida zambullida en la extinción.

La gravedad es una fuerza acumulativa, de modo que no es sorprendente que sus efectos sean más pronunciados en cuestiones cosmológicas: las estructuras a gran escala del universo. En dos sentidos puede ser importante la elasticidad del espacio-tiempo. El primero, señalado originalmente por el propio Einstein, es que el

espacio podría no ser infinito en extensión, sino, como la superficie de la Tierra, curvado «alrededor de la otra cara» del universo de tal forma que constituyera una hiperesfera: una versión en más dimensiones de la superficie esférica.

No nos es posible visualizar mentalmente una hiperesfera, pero podemos calcular sus propiedades, una de las cuales sería la posibilidad de dar la vuelta al cosmos avanzando siempre en la misma dirección hasta regresar al punto de partida desde la dirección contraria. Otra es que, si bien el volumen del espacio es limitado, en ninguna parte existe una barrera o límite, como tampoco hay ningún centro ni borde.

(Todas estas propiedades las comparte la superficie esférica).

Pero de momento no sabemos si hay en el universo suficiente materia para producir este cierre topológico completo.

La segunda posibilidad del espacio-tiempo elástico es que, a escala cosmológica (es decir, en distancias mucho mayores que las galaxias) el espacio no sea estático, sino que se ensanche o encoja. A finales de la década de 1920 el astrónomo norteamericano Edwin Hubble descubrió que el universo, en realidad, se está expandiendo; es decir, que el espacio se ensancha por todas partes, al parecer, de manera muy uniforme, un hecho de cierta significación sobre el que volveremos más adelante. Hubble se dio cuenta de que las galaxias lejanas parecen retroceder con respecto a nosotros y a todas las demás galaxias, conforme las va estirando la expansión del espacio.

La prueba de este fenómeno se encuentra en la modificación de la

longitud de onda de la luz, de la que ya nos hemos ocupado al hablar del púlsar binario. En el caso de la luz visible, el alargamiento de las ondas luminosas emanadas de una galaxia lejana hace que parezcan de color más rojo del que tendrían de estar la galaxia inmóvil con respecto a nosotros. El enrojecimiento cosmológico aumenta de forma directamente proporcional a la distancia que nos separa de las galaxias, que es exactamente el tipo de cambio que resultaría si el movimiento de expansión fuese uniforme y estuviera ocurriendo en todo el universo. El hecho de que todas las galaxias parezcan estar alejándose de nosotros no significa que estemos situados en el centro del cosmos, pues el mismo tipo de retroceso se vería desde cualquier otra galaxia. Las galaxias no se expanden alejándose de ningún punto especial; el universo no tiene centro ni borde discernibles, ni siquiera con ayuda de nuestros mayores telescopios.

Si las galaxias se mueven alejándose cada vez más, de ahí se deduce que deben haber estado más juntas en el pasado. Mirando hacia regiones lejanas del universo, los astrónomos pueden ver el tiempo pasado, puesto que la luz procedente de los objetos más lejanos, visibles normalmente por los telescopios, puede haber tardado varios miles de millones de años en llegar hasta nosotros, dada su lejanía.

Por tanto, los telescopios nos proporcionan una imagen del aspecto que tenía el universo hace miles de millones de años. Con ayuda de los radiotelescopios, el retroceso visual en el tiempo puede alcanzar

alrededor de quince mil millones de años, momento en que ocurre un hecho notable. Las galaxias dejan de existir y, en realidad, todas las estructuras que ahora observamos — estrellas, planetas e incluso átomos normales— no podían haber estado presentes. Esta temprana época desempeñará un papel central en el tema de este libro y se estudiará detalladamente en el capítulo 9. De momento sólo es preciso mencionar que la expansión del universo fue entonces mucho más rápida que hoy, y que el contenido del universo estaba enormemente comprimido y caliente. Esta fase caliente, densa y en explosión ha sido denominada el Big Bang y hay astrónomos que creen que no sólo señala el comienzo del universo tal como ahora lo conocemos, sino quizás el comienzo del propio tiempo. El Big Bang no fue, por lo que nosotros podemos saber, la explosión de una gran masa de materia dentro de un vacío preexistente, pues esto implicaría un núcleo central y un límite en la distribución de la materia. Lo que en realidad representa el Big Bang, al parecer, es el límite de la existencia, un concepto que se aclarará en las páginas siguientes.

Capítulo III
El caos subatómico

A todo lo largo de la historia el hombre ha visto sus relaciones con el mundo de dos maneras: como observador y como participante.
Nosotros somos conscientes de los procesos físicos que tienen lugar a nuestro alrededor, interpretándolos mediante modelos mentales internos que reflejan esa actividad exterior. Además, nos vemos motivados a actuar sobre el mundo exterior, en pequeña escala mientras vivimos la vida cotidiana y en gran escala, colectivamente, cuando utilizamos la tecnología para modificar el medio ambiente. A pesar de tener un alcance bastante modesto en comparación con las grandes fuerzas cósmicas, nuestra tecnología demuestra, no obstante, que la existencia de la especie biológica llamada homo sapiens desempeña un papel en la conformación del universo, aunque de momento tan sólo sea en una pequeña escala. Con la revolución newtoniana, la participación del hombre pareció quedar algo vacía, porque, aunque difícil de negar, en un universo mecánico, el hombre mecánicamente motivado no se distingue de sus máquinas: Desde el esfuerzo por transformar el medio ambiente hasta el mínimo movimiento de un dedo, las acciones humanas parecen estar tan rígidamente predeterminadas y ser tan involuntarias como los movimientos de los planetas.
Examinemos ahora la visión newtoniana del hombre como observador.

¿A qué nos referimos en realidad con el acto de observar? La mecánica de Newton evoca el cuadro de un universo cruzado por una red de influencias, en el que cada átomo actúa sobre todos los demás con fuerzas pequeñas pero significativas. Todas las fuerzas que sabemos que existen comparten la propiedad de que disminuyen con la distancia, que es lo que hace que no tengamos en cuenta el efecto de Júpiter sobre las mareas ni tampoco el movimiento de Andrómeda cuando se trata del vuelo de los aviones. Si las fuerzas no se desvanecieran con la distancia, los asuntos terrestres estarían dominados por la materia más lejana, pues hay muchísimas más galaxias esparcidas por la lejanía que próximas. Sin embargo, en lo que respecta a las fuerzas newtonianas, alguna influencia residual, por infinitesimal que sea, sigue actuando entre las partículas de materia separadas por inmensas distancias. Este entretejido de toda la materia en un todo colectivo hace pensar en las palabras de Francis Thompson:

Por un inmortal poder, todas las cosas,
cercanas o lejanas,
ocultamente,
están ligadas entre sí,
de modo que no puedes arrancar una flor
sin perturbar las estrellas.

Está claro que hay un problema filosófico relativo a las contradicciones entre un universo integrado por fuerzas invisibles y

el sistema de determinar las leyes de la naturaleza por el procedimiento de aislar un sistema del medio que lo rodea, tal como hemos explicado en el capítulo 1. Si no conseguimos librar la materia de su red de fuerzas, nunca estará verdaderamente aislada y las leyes matemáticas que deduzcamos sólo podrán ser, en el mejor de los casos, extrapolaciones idealizadas del mundo real. Además, la noción crucial de repetibilidad —es decir que según las leyes, los sistemas idénticos deben comportarse de la misma manera— también queda negada. No existen sistemas idénticos. Puesto que el universo cambia de un día a otro y de un lugar a otro, el entramado de fuerzas cósmicas nunca puede ser absolutamente idéntico.

A pesar de todas estas objeciones, la ciencia aplicada avanza rápidamente suponiendo que la influencia, pongamos, de Júpiter sobre el movimiento de un automóvil es inferior a cualquier valor medible por un instrumento. No obstante, cuando se trata de hacer observaciones, son precisamente esas fuerzas diminutas las que juegan un papel vital. Si no fuera por el hecho de que «algunas» influencias de Júpiter tienen un efecto detectable, nunca podríamos conocer su existencia. La ineludible conclusión es que todas las observaciones exigen interacción, sea de una u otra clase. Cuando observamos Júpiter, los fotones de luz solar reflejados en los átomos de su atmósfera atraviesan los varios cientos de millones de kilómetros de espacio interpuesto, penetran en la atmósfera de la Tierra y chocan con las células retinianas, desalojando electrones de

los átomos allí situados. Esta mínima perturbación da lugar a una pequeña señal eléctrica que, una vez amplificada y conducida al cerebro, proporciona la sensación «Júpiter». De ahí se deduce que, a través de esta cadena, las células cerebrales están ligadas por fuerzas electromagnéticas a la atmósfera de Júpiter.

Si la cadena de interacciones se amplía mediante el uso de telescopios, nuestro cerebro entra en conexión con la superficie de las estrellas situadas a miles de millones de años luz.

Un rasgo importante de cualquier tipo de interacción es que si un sistema perturba a otro, lo que da lugar a que se registre su existencia, inevitablemente habrá una reacción recíproca sobre el primer sistema, que a su vez resulta afectado. El principio de acción y reacción es conocido por las mediciones rutinarias de la vida cotidiana. Para medir una corriente eléctrica, se inserta en el circuito un amperímetro, cuya presencia será un obstáculo para la propia corriente que se está midiendo.

Para medir el brillo de una luz es necesario absorber parte de las radiaciones a modo de muestra.

Para medir la presión de un gas, tenemos que dejar que el gas actúe sobre un artilugio mecánico, como es un barómetro, pero el trabajo que realiza lo pagará en términos de la energía interna del gas, cuyo estado queda consecuentemente alterado. Si deseamos medir la temperatura de un líquido caliente, sirve introducirle un termómetro, pero la presencia del termómetro hará que el calor fluya del líquido al termómetro hasta ponerlos a una misma

temperatura. Por tanto, el líquido se enfriará algo, de modo que la lectura que haremos de la temperatura no será la temperatura original del líquido, sino la del sistema una vez perturbado.

En todos estos ejemplos, el acceso a las condiciones de los sistemas físicos se consigue mediante el uso de sondas. A veces se dispone de técnicas más pasivas, como cuando medimos la localización de un cuerpo simplemente mirándolo, cual es el caso de Júpiter. No obstante, para conseguir cualquier información, «alguna» clase de influencia tiene que pasar del objeto al observador, aunque la reacción pueda carecer absolutamente de importancia para fines prácticos. En el caso de Júpiter, este planeta sería imperceptible de no ser por la iluminación de la luz solar.

Esta misma luz solar que, al reflejarse, nos estimula la retina, también reacciona sobre Júpiter ejerciendo una pequeña presión sobre su superficie. (La presión de la luz solar produce un efecto perceptible y espectacular cuando crea las colas de los cometas). Por tanto, no podemos ver estrictamente el «verdadero» Júpiter, sino el Júpiter perturbado por la presión de la luz. El mismo razonamiento puede aplicarse a todas nuestras observaciones del mundo que nos rodea. Nunca es posible, ni siquiera en teoría, observar las cosas, sino sólo la interacción entre las cosas. Nada puede verse aislado, pues el mismo acto de la observación conlleva alguna clase de conexión.

La observación de Júpiter ejemplifica una situación en que el observador sólo tiene un control parcial de las circunstancias; la luz

del sol es aportada, por así decirlo, espontáneamente. Por tanto, la reacción a la presión de la luz se producirá tanto si elegimos mirar la luz reflejada como si no. En este sentido, no puede afirmarse que Júpiter sufra una perturbación porque nosotros elijamos observarlo, si bien nunca podríamos observarlo sin esa perturbación. En el laboratorio, como ilustran los anteriores ejemplos, la involucración del observador y de sus instrumentos es más directa.

Llegamos ya al rasgo crucial del acto de observar tal como se entendía en la visión newtoniana del universo, un rasgo que acabó desmoronándose con el inicio de la teoría cuántica. En primer lugar, si se conocen las leyes físicas, aunque la medición u observación conlleve necesariamente una perturbación del objeto a examinar, esta perturbación puede calcularse con exactitud y descontarse al deducir el resultado. Así, la medición de la temperatura de un líquido es corregible si se conocen las propiedades térmicas del termómetro y su temperatura inicial. En un mundo donde todos los movimientos de los átomos están rigurosamente determinados por leyes matemáticas es posible, al menos en principio, tener en cuenta incluso las perturbaciones más ínfimas del proceso de medición. En segundo lugar, con suficiente ingenio y habilidad tecnológica es posible, según la teoría newtoniana, reducir las perturbaciones inoportunas a una cuantía arbitrariamente pequeña.

La mecánica newtoniana no impone un límite inferior al grado de interacción entre dos sistemas. En consecuencia, si se deseara medir la localización de un cuerpo sin apartarlo de su curso por la

presión de la luz, podríamos utilizar un destello que lo iluminara durante un tiempo arbitrariamente breve.

Cierto es que sería menester ampliar la luz reflejada cada vez más conforme disminuyera la cantidad de luz lanzada por el destello, pero este problema es tecnológico y económico, y no de física fundamental. La conclusión parece ser que, al menos en principio, la perturbación inevitable de toda observación puede aproximarse tanto como se quiera al límite cero (aunque, desde luego, no pueda alcanzarlo).

Mientras la ciencia se ocupó de objetos macroscópicos, poca atención se prestó a los límites últimos de la mensurabilidad, pues en los experimentos prácticos nunca se alcanzaban las proximidades de tales límites. La situación cambió alrededor de comienzos del siglo, cuando quedó bien asentada la teoría atómica de la materia y se comenzaron a investigar las partículas subatómicas y la radioactividad. Los átomos son tan delicados que fuerzas increíblemente diminutas desde el punto de vista ordinario, pueden ocasionarles, sin embargo, perturbaciones drásticas.

Los problemas de llevar a cabo cualquier clase de medición sobre un objeto de un tamaño de tan sólo diez mil millonésimas de centímetro y que pesa una billonésima de una billonésima de un gramo, sin destruirlo, no digamos sin trastornarlo, son formidables. Cuando se llega al estudio de las partículas subatómicas, como los electrones, mil veces más ligeras y sin el menor tamaño discernible, surgen profundos problemas de principio al tiempo que dificultades

prácticas.

Como introducción a los conceptos generales podríamos considerar sencillamente el problema de cómo cerciorarse de dónde está localizado un determinado electrón.

Es evidente que es necesario enviar alguna clase de sonda para que lo localice, pero ¿cómo hacerlo sin perturbarlo o, al menos, perturbándolo de una manera controlada y determinable? Una forma directa sería tratar de ver el electrón utilizando un potente microscopio, en cuyo caso la sonda utilizada sería la luz. Al igual que en el caso de Júpiter, pero en un grado incomparablemente mayor al tratarse de un electrón, la iluminación ejercería una perturbación como consecuencia de su presión. Si enviamos una onda luminosa, la partícula retrocederá. El problema no es grave si podemos calcular con qué velocidad y en qué dirección se alejará el electrón al retroceder, pues entonces, conociendo la situación en un momento determinado, será una pura cuestión de cálculo deducir dónde estará la partícula en un instante posterior.

Para conseguir una buena imagen en el microscopio es necesario tener grandes lentes en el objetivo, si no la luz, al ser una onda, no pasará por la abertura sin distorsionarse. El problema, en este caso, es que las ondas de luz rebotan en los lados de las lentes e interfieren el rayo original, con la consecuencia de que la imagen se emborrona y se pierde resolución.

Es necesario utilizar una abertura mucho mayor que el tamaño de las ondas (es decir, que la longitud de onda). Esta es la razón de que

los radiotelescopios deban ser mucho mayores que los telescopios ópticos, ya que las longitudes de las ondas de radio son muy grandes. De donde se deduce que para ver adecuadamente un electrón deberíamos utilizar un gran microscopio o una longitud de onda muy pequeña, pues en caso contrario la imagen sería demasiado borrosa para permitir medir con exactitud su localización. Además de esto, es un hecho habitualmente visible en la orilla del mar que cuando las grandes olas del mar tropiezan con un poste o un muelle, se separan momentáneamente al chocar con el obstáculo, pero vuelven a unirse detrás de él para proseguir relativamente inalteradas. De manera que la forma de la ola y, por lo mismo, de una onda de gran tamaño, transporta muy poca información sobre la localización o forma del poste. Por otra parte, los pequeños rizos del agua son seriamente perturbados por un poste y su forma se descompone en una figura compleja. Observando la desorganización se puede deducir la presencia del poste. Algo similar ocurre con las ondas de luz: para ver un objeto hay que utilizar ondas cuya longitud sea similar o menor que el tamaño del objeto en cuestión. Para localizar un electrón, se deben utilizar ondas de la longitud más corta posible (por ejemplo, rayos gamma), puesto que su tamaño es indistinguible de cero. De cualquier modo, no es posible determinar su posición con mayor exactitud que la de una longitud de onda de la luz utilizada.

Es ahora cuando la naturaleza cuántica de la luz desempeña un papel de crucial importancia. En el capítulo 1 se explicó que la luz

sólo existe en paquetes o cuantos, llamados fotones, y que cuando un átomo absorbe o emite luz sólo lo hace en un número entero de fotones. Esto dota a la luz con algunas de las cualidades de las partículas, puesto que los fotones transportan una determinada energía e impulso; de hecho, la presión de la luz puede considerarse que no es más que el retroceso que ocasiona el choque con los fotones. No obstante, de ahí no se deduce que la luz consista realmente en pequeños corpúsculos localizados. El fotón no está concentrado en un lugar, sino que se extiende por toda la onda. La naturaleza corpuscular del fotón sólo se manifiesta en el modo en que interacciona con la materia. La energía y el impulso que transporta un fotón disminuyen en proporción inversa a su longitud de onda, lo que conlleva que los fotones de las ondas de radio sean entidades inmensamente débiles, mientras que la luz, y especialmente los rayos gamma, tengan mucha más pegada. Esto nos plantea un rompecabezas cuando tratamos de ver el electrón, puesto que la necesidad de utilizar radiaciones de longitud de onda muy pequeña, para eludir que la imagen se emborrone, entraña aceptar el violento retroceso consiguiente al empuje de estos enérgicos cuantos. Nos vemos, pues, obligados a escoger entre exactitud de la localización y perturbación del movimiento del electrón. El dilema resultante es que, para determinar exactamente la cuantía del retroceso, precisamos conocer el ángulo exacto con que el fotón rebota, y esto sólo puede conseguirse utilizando un microscopio de abertura muy estrecha (véase Figura 7). Pero, como

ya hemos explicado, esta estrategia tendrá como consecuencia una imagen borrosa y una pérdida de información sobre la posición del electrón. Tampoco ayudará a reducir el retroceso el uso de ondas mayores, pues entonces estaríamos obligados a utilizar microscopios de mayor abertura para evitar la confusión de las ondas, lo que inevitablemente aporta una mayor inseguridad a la medición del ángulo.

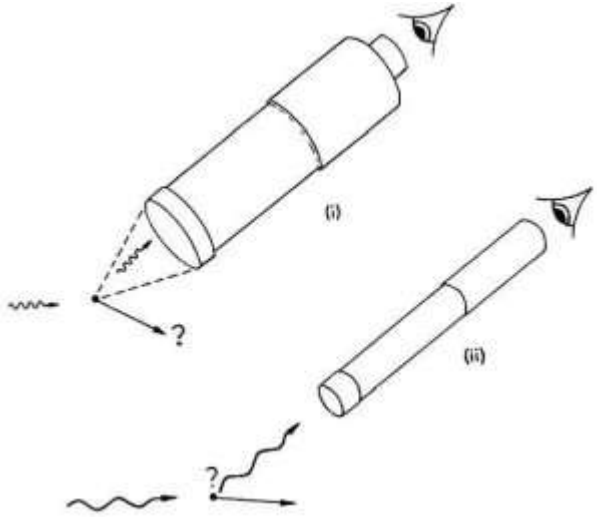

Figura 7. El principio de incertidumbre. (i) Para localizar exactamente un electrón se necesitan grandes lentes y longitudes de onda cortas, pero se paga el precio de desconocer el retroceso, pues el fotón rebotado podría entrar en el microscopio por cualquier lugar del cono que determinan las líneas de rayas. Además, los fotones de corta longitud de onda golpean muy fuerte al electrón. (ii) Para calcular el retroceso con exactitud, se necesita un cono de ángulo estrecho y fotones débiles (de gran longitud de onda), pero esta estrategia produce una imagen borrosa, con lo que destruye los datos sobre la

posición del electrón. El conocimiento exacto de la posición y el movimiento es imposible, incluso en teoría.

Debe haber quedado claro que los requisitos de una exacta determinación, al mismo tiempo, de la posición y del movimiento son mutuamente incompatibles. Hay una limitación fundamental de la cantidad de información que puede conseguirse sobre el estado del electrón. Se puede medir con precisión su localización a costa de introducir una perturbación aleatoria y totalmente indeterminable en su movimiento. O, alternativamente, se puede retener el control sobre el movimiento, a costa de una gran inseguridad sobre la posición. Este indeterminismo recíproco no es una mera limitación práctica debida a las propiedades de los microscopios, sino un rasgo básico de la materia microscópica. No hay manera, ni siquiera en teoría, de obtener simultáneamente una información exacta sobre la posición y el momento de una partícula subatómica. Estas ideas han sido consagradas en el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg, que describe el monto de la incertidumbre en una fórmula matemática de la que puede deducirse la exactitud última de cualquier medición.

Las consecuencias del principio de incertidumbre son iconoclastas. En el capítulo 1 vimos que el conocimiento de la posición y del movimiento de una partícula bastaba para determinar todo su comportamiento, caso de conocerse las fuerzas actuantes (o las posiciones y movimientos de todas las demás partículas). Ahora

resulta que no es posible reunir tal información en detalle; siempre hay una incertidumbre residual. Volvamos al problema del lanzamiento de la bola y al problema de cómo representar las condiciones iniciales en el diagrama de la Figura 1. Cada punto del diagrama representa una determinada velocidad y dirección de lanzamiento de la bola, y las leyes de la mecánica newtoniana proporcionan predicciones de las subsiguientes trayectorias que seguirá la bola.

Los puntos vecinos representan trayectorias vecinas. Si no se conoce exactamente el punto del diagrama, no es posible predecir con exactitud la trayectoria futura. Puede ocurrir que sepamos que el punto se sitúa en alguna región del diagrama, pero eso limita nuestras predicciones a una especie de planteamiento estadístico sobre las probabilidades relativas de las distintas trayectorias de un entorno.

De acuerdo con el principio de Heisenberg, siempre habrá una incertidumbre residual sobre la posición y el movimiento en el momento inicial, aunque en el caso de una bola de verdad el efecto sea demasiado pequeño para percibirlo. Podríamos decidir fijar con precisión el punto de partida en cuyo caso el ángulo de lanzamiento será muy inseguro. También cabría fijar el ángulo con bastante precisión, en cuyo caso el punto de lanzamiento se haría impreciso. O bien se puede elegir una solución intermedia. Cualesquiera que sean las medidas que se adopten, la zona de incertidumbre del diagrama no se reducirá a cero. De ahí se deduce que siempre

habrá cierta indeterminación sobre la trayectoria posterior que siga la bola. Sólo puede hacerse una predicción estadística. A escala cotidiana, la incertidumbre cuántica queda borrada por otras fuentes de error, como las limitaciones de los instrumentos, pero el movimiento de las bolas «atómicas» se ve profundamente afectado por los efectos cuánticos.

Una reacción instintiva frente a estas ideas es suponer que la incertidumbre es en realidad una consecuencia de nuestra falta de destreza en las investigaciones atómicas, una consecuencia de nuestro tamaño macroscópico. Pudiera pensarse que el electrón tiene «en realidad» una posición y un movimiento bien definidos, pero que nosotros somos demasiado manazas para descubrirlos. En general, tal suposición se considera absolutamente errónea, por razones que trataremos extensamente en el capítulo 6. La incertidumbre parece ser una propiedad inherente del microcosmos y no una mera consecuencia de nuestra ineptitud para observar las partículas subatómicas. No se trata tan sólo de que no podamos conocer las magnitudes del electrón. Se trata sencillamente de que el electrón no posee simultáneamente una posición y un impulso concretos. Es una entidad intrínsecamente incierta.

Cabría preguntarse si es posible decir algo sobre el comportamiento de objetos tan caprichosos y reticentes. No podemos conocer el exacto comportamiento, sino tan sólo una masa de comportamientos verosímiles. El movimiento del electrón por el espacio no es, pues, algo bien definido, sino más bien una especie

de campo de probabilidades por el que discurren las trayectorias disponibles y posibles a la manera de un fluido.

En 1924, el príncipe Louis de Broglie propuso que el comportamiento de los electrones era de hecho análogo al de los fluidos; concretamente, afirmó que las trayectorias posibles se despliegan en forma de onda u ola. Por tanto, al igual que el lanzamiento de una piedra en un estanque da lugar a una serie de ondulaciones procedentes de una región, del mismo modo, si se sueltan electrones, éstos se esparcirán en muchas direcciones, extendiéndose como las ondulaciones por el estanque.

La idea de Broglie es mucho más que un vago símil de desplazamiento. El movimiento de una onda es algo muy especial, tanto física como matemáticamente. Una de sus características vitales es la capacidad que tienen las ondas de interferirse entre sí. El fenómeno de la interferencia de las ondas es conocido en la vida cotidiana y también desempeña un papel fundamental en la descripción cuántica de la materia y en las consecuencias que más adelante estudiaremos.

Un lugar adecuado para ver la interferencia de las ondas es un estanque. Si se lanzan simultáneamente dos piedras muy juntas al estanque, cada una da lugar a una serie de ondulaciones. Cuando las dos series de ondas se cruzan se crea sobre el agua una distribución sistemática de crestas y surcos.

Esto ocurre porque donde coincide una cresta de una de las ondulaciones con la de la otra, el efecto se refuerza, pero donde la

cresta de una encuentra el surco de la otra ambas se contrarrestan y la superficie del agua permanece relativamente inalterada.

En la década de 1920, los físicos comprendieron que si de Broglie tenía razón debían producirse interferencias cuando se superponen haces de electrones, pues los movimientos ondulatorios de cada haz se superpondrían con los de los otros. De pronto, los experimentos de Davisson, de que hemos hablado en el capítulo 1, adquirieron un nuevo significado.

Davisson descubrió que los electrones, cuando son dispersados por la superficie de un cristal de níquel, rebotan según una sucesión de haces que posteriormente se superponen. En 1927 demostró, más allá de toda duda, que los haces superpuestos se refuerzan o contrarrestan según el modelo clásico de la interferencia de las ondas. La conclusión fue sorprendente: los electrones se comportaban como ondas al mismo tiempo que como partículas.

¿Qué significa esto? Hemos visto antes que las ondas luminosas se comportan en algunos aspectos, aunque no en todos, como partículas, a las que llamábamos fotones.

Ahora parece ser que encontramos una dualidad comparable en la identidad de los electrones. No obstante, es fundamental comprender que la naturaleza ondulatoria de los electrones no implica que el electrón «sea» una onda, sino sólo que se mueve como una onda. Además, la onda en cuestión no es una onda de ninguna clase de sustancia o materia, sino una onda probabilística. Donde el efecto de la onda es mayor, allí es más probable que se encuentre el

electrón. En este sentido recuerda una oleada de delincuencia que, cuando se extiende por un barrio, aumenta la probabilidad de que se cometa un delito. No es una ondulación de ninguna sustancia, sino sólo de probabilidad.

Estas ideas son estimulantes y provocativas, pero también son sutiles y desconcertantes. Se comprenden mejor estudiando una situación donde tanto la naturaleza de onda como la de partícula, de los electrones o de los fotones, se manifiesten al unísono. Un ejemplo es el experimento llamado de las dos ranuras. El esquema se muestra en la Figura 8 y consiste en una pantalla opaca con dos ranuras paralelas muy próximas. Las ranuras se iluminan mediante un rayo de luz de manera que sus imágenes caigan sobre otra pantalla situada en la cara contraria. Si momentáneamente obturamos una de las ranuras, la imagen de la otra aparecerá como una franja de luz situada enfrente de la ranura abierta. Dado que la ranura abierta es estrecha, las ondas luminosas sufrirán una distorsión al atravesarla, de modo que parte de la luz se desperdigará por los lados de la franja, por lo que los bordes aparecen borrosos. Si la ranura es muy estrecha, es posible que la luz se extienda por un área bastante amplia. Cuando esté obturada la otra ranura y abierta la primera, se verá una imagen similar, pero ligeramente desplazada enfrente de esta ranura.

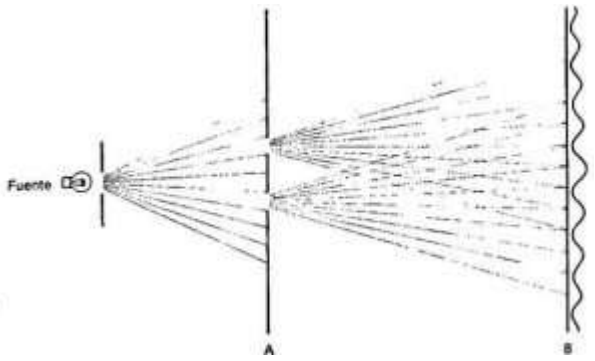

Figura 8. ¿Ondas o partículas? En el experimento de las dos ranuras, los electrones o fotones de una única fuente pasan por dos aberturas cercanas de una pantalla A y avanzan hasta chocar con la pantalla B, donde queda registrada la forma en que llegan. La curva dibujada junto a B representa esa forma. El diagrama de crestas y vientres indica un fenómeno de interferencia de ondas.

La sorpresa surge cuando se abren al mismo tiempo las dos ranuras. Lo que podría preverse es que la imagen de la doble ranura consistiera en la superposición de dos imágenes de una ranura, lo que tendría el aspecto de dos franjas de luz más o menos superpuestas debido a lo borroso de sus bordes.

En realidad, lo que se ve es una serie de líneas regulares, compuesta de franjas oscuras y luminosas, que el primero en descubrirlas fue el físico inglés Thomas Young en 1803. Este curioso diagrama es precisamente el fenómeno de interferencia de ondas antes mencionado.

Cuando la luz que emanan las dos ranuras llega en oposición de fase, es decir, las crestas de las ondas procedentes de una ranura coinciden con los vientres de las otras, la iluminación desaparece.

El experimento puede repetirse con electrones en lugar de luz, utilizando una pantalla de televisión como detector. Debemos recordar aquí que cada electrón individual es taxativamente una partícula. Los electrones pueden contarse uno por uno y puede explorarse su estructura utilizando máquinas de elevada energía. Por lo que a nosotros se nos alcanza, no tienen partes internas ni extensión discernible. Se rocían las ranuras a través de un pequeño agujero con electrones procedentes de una especie de pistola. Los electrones que pasan por una u otra ranura alcanzarán la pantalla detectora y chocarán contra ella, liberando su energía en forma de pequeños destellos de luz. (Este es el fundamento de la imagen televisiva).

Mediante el control de los destellos, se toma exacta nota del lugar adonde llegan los electrones y se determina la manera en que se distribuyen por la pantalla detectora.

Observemos lo que ocurre cuando sólo está abierta una de las ranuras y, de momento, cerrada la otra.

El chorro de electrones atravesará la ranura, se esparcirá hacia el exterior y se proyectará sobre la pantalla detectora. La mayoría de ellos llega muy cerca de la zona situada enfrente de la ranura abierta, aunque algunos se esparcirán por los alrededores. La distribución de los electrones recuerda el diagrama luminoso que se obtiene empleando luz. Una distribución similar, ligeramente desplazada, resultaría en el caso de abrir la segunda ranura y mantener bloqueada la primera. Lo fundamental del experimento es

que, de nuevo, cuando se operan ambas ranuras, la distribución de los electrones muestra una estructura regular de franjas de interferencia, lo que indica la naturaleza ondulatoria de estas partículas subatómicas.

En este caso, el resultado tiene un carácter casi paradójico.

Supongamos que la intensidad del haz de electrones disminuye gradualmente hasta que los electrones pasan de uno en uno por el aparato.

Se puede recoger el impacto de cada electrón contra la pantalla utilizando una placa fotográfica.

Al cabo de cierto tiempo dispondremos de un montón de placas fotográficas, cada una de las cuales contiene un único punto de luz correspondiente al lugar donde cada electrón concreto ha encendido un destello con su presencia. ¿Qué podemos decir ahora sobre cómo se distribuyen los electrones por la pantalla? Podemos determinarlo mirando a través de la pila de placas superpuestas, con lo que veremos todos los puntos formando un dibujo. Lo asombroso es que ese dibujo es exactamente el mismo que se produce cuando se dispara un gran número de electrones, y también exactamente el mismo que forman las ondas luminosas (aunque quizás un poco menos denso si somos parcos con los electrones). Es evidente que el conjunto de acontecimientos distintos y separados, a base de un electrón cada vez, sigue presentando un fenómeno de interferencia. Además, si en lugar de repetir el experimento electrón por electrón, toda una serie de laboratorios realizan el experimento de manera

independiente, y tomamos al azar una fotografía de cada prueba, entonces, el conjunto de todas estas fotografías independientes y hechas por separado ¡también presenta un diagrama de interferencias!

Estos resultados son tan asombrosos que cuesta digerir su significación. Es como si alguna mágica influencia fuera dictando los acontecimientos en los distintos laboratorios, o en momentos distintos del mismo equipo, de acuerdo con algún principio de organización universal. ¿Cómo sabe cada electrón lo que los demás electrones van a hacer, quizás en otras partes distintas del globo? ¿Qué extraña influencia impide a los electrones personarse en las zonas oscuras de las franjas de interferencia y les hace dirigirse hacia las zonas más populosas?

¿Cómo se controla su preferencia en el plano individual? ¿Es magia? La situación resulta aún más extravagante si recordamos que la interferencia característica surge, en primer lugar, como consecuencia de que las ondas de una ranura se superponen a las de la otra. Es decir, la interferencia es taxativamente una propiedad de las «dos» ranuras. Si se bloquea una, la interferencia desaparece. Pero sabemos que cada electrón concreto (por ser una pequeña partícula) sólo puede pasar por una de las ranuras, de manera que ¿cómo se entera de la existencia de la otra?

Sobre todo, ¿cómo sabe si la otra está abierta o cerrada? Parece que la ranura por donde no pasa el electrón (y que a escala subatómica está a una inmensa distancia) tiene tanta influencia sobre el

posterior comportamiento del electrón como la ranura por la que en realidad pasa.

Comenzamos a vislumbrar ya algo de la naturaleza profundamente peculiar del mundo subatómico. En el capítulo 1 se mencionó que el electrón no está constreñido por leyes deterministas a seguir una única trayectoria, y más adelante se ha mostrado que el principio de incertidumbre de Heisenberg impide al electrón poseer una trayectoria bien definida. Con el experimento de las dos ranuras vemos el funcionamiento de esta indeterminación inherente, pues debemos sacar la conclusión de que los trayectos «potenciales» del electrón pasan por ambas ranuras de la pantalla y que las trayectorias que no sigue continúan influyendo en el comportamiento de la trayectoria real.

Dicho en otras palabras, los mundos alternativos, que podrían haber existido, pero que no han llegado a existir, siguen influyendo en el mundo que existe, como la desvanecida sonrisa del gato de Cheshire en el cuento de Alicia. Ahora es posible comprender por qué las ondas asociadas con los electrones no son ondas de electrones, sino ondas probabilísticas.

La interferencia que aparece en el sistema de dos ranuras no puede ser una interferencia entre muchos electrones distintos, sino desaparecería al utilizarse los electrones de uno en uno. Es una interferencia probabilística. La localización probabilística de un único electrón puede explorar ambas ranuras e interferir consigo misma. Con lo que se interfiere es con la propensión del electrón a

ocupar una determinada zona del espacio. De tal modo que un electrón concreto tiene más probabilidades de dirigirse hacia las franjas claras que hacia las franjas oscuras.

Dada la incertidumbre inherente a la posición y al movimiento que da lugar al comportamiento ondulatorio, no puede predecirse dónde terminará un determinado electrón, pero algo puede decirse sobre todo el conjunto de ellos por medio de una estadística muy simple. Precisamente esta distribución estadística a que están sometidos el movimiento ondulatorio y los efectos de interferencias es la que debe tenerse en cuenta en cualquier cálculo.

Esto muestra con absoluta claridad cómo los electrones evitan desplomarse sobre los núcleos de los átomos. Sus ondas probabilísticas se mantienen vibrando alrededor del átomo de manera uniforme.

Sólo pueden presentarse determinadas órbitas fijas, pues si la perturbación ondulatoria no encaja adecuadamente, con crestas y vientres en la debida relación, comenzará a tener superposiciones e interferencias consigo misma y acabará anulándose en la nada. De ocurrir esto, habría una probabilidad cero (ninguna posibilidad en absoluto) de encontrar un electrón.

El fenómeno es similar a la estructura ondulatoria del aire en los tubos de un órgano: sólo pueden darse determinadas notas bien definidas, puesto que los tipos de ondas de aire tienen que encajar con la geometría de los tubos. Asimismo, pues, sólo determinadas notas, es decir, determinadas frecuencias o energías, pueden darse

alrededor del átomo. Los colores característicos que se emiten en las transiciones entre estos niveles energéticos permitidos son el testimonio visual de esta música subatómica. Y exactamente igual como el tubo de un órgano tiene su nota más baja, así hay un nivel mínimo de energía en el átomo.

Indudablemente todo esto significa un gran logro para nuestra comprensión del mundo subatómico, porque la estabilidad de los átomos frente a su desmoronamiento fue uno de los grandes misterios que dio lugar al rechazo de la física newtoniana aplicada a los átomos. El hecho de que las ondas de un instrumento musical produzcan una diversidad de notas discretas y que los átomos emitan frecuencias luminosas características no parece guardar, a primera vista, ninguna relación, pero la naturaleza ondulatoria de la materia cuántica pone de manifiesto la hermosa unidad del mundo físico y demuestra que estos fenómenos son esencialmente idénticos. Por tanto, podemos considerar que el espectro luminoso de un átomo es similar a la estructura sonora de un instrumento musical.

Cada instrumento produce un sonido característico, y lo mismo que el timbre del violín difiere marcadamente del timbre del tambor o del clarinete, así la mezcla de colores de la luz de un átomo de hidrógeno se diferencia de modo característico del espectro del átomo de carbono o de uranio. En ambos casos existe una profunda asociación entre las vibraciones internas (membranas oscilantes, electrones ondulantes) y las ondas externas (sonido y luz).

Antes de abandonar el experimento de las dos ranuras, debemos describir un rasgo divertido. ¿Sabe «realmente» el electrón si la otra ranura está abierta o cerrada? Para descubrirlo podemos recurrir a la siguiente maniobra. Colóquese un detector delante de las ranuras y señálese aquella a que se dirige el electrón; luego, actúese rápidamente y bloquéese la otra. Si el electrón se percata de esta manipulación, no aparecerá la interferencia cuando combinemos todos los resultados de muchos experimentos similares. Por una parte, es casi imposible de creer que el electrón pueda realmente saber nuestras intenciones y modificar su movimiento de acuerdo con éstas; por otra parte, sabemos que si una ranura está permanentemente bloqueada no hay interferencia.

Evidentemente, desbloquear el agujero cuando no hay electrones cerca no puede afectar el resultado, ¿no es verdad? En ambos casos la naturaleza parece estar jugando con nosotros.

Una forma sencilla de llevar a cabo este experimento consiste en proyectar un rayo de luz desde el agujero de entrada hacia las ranuras y estar al tanto del pequeño destello en el momento en que pasa el electrón. Naturalmente, debemos tener en cuenta el retroceso del electrón cuando choca con la luz y acordarnos de los problemas que planteaban los microscopios, tal como lo hemos tratado. Para determinar a qué ranura se acerca el electrón debemos utilizar una luz cuya longitud de onda sea corta en comparación con la distancia entre las ranuras o bien no conseguiremos una imagen lo bastante clara para decir cuál es la

ranura más próxima. Sin embargo, una luz de longitud de onda corta producirá una perturbación relativamente grande en el movimiento del electrón que nos interesa, y el resultado será que el retroceso causado por una luz cuya longitud de onda sea lo bastante corta es tan grande que destruye por completo la interferencia. El impredecible retroceso destruye por completo la forma regular de las franjas. Parece que la naturaleza nos impide automáticamente responder a la pregunta crucial: ¿sabe el electrón si la otra ranura está abierta o cerrada? La interferencia de los electrones es un fenómeno que precisa que ambas ranuras estén abiertas, pero cada electrón concreto sólo puede pasar por una de las ranuras. Vemos pues que la interferencia sólo se producirá si no investigamos demasiado a fondo qué ranura elige el electrón. Ambas deben estar abiertas; cada una de ellas ofrece una trayectoria potencial, aunque sólo una puede ser la trayectoria real. Cuál sea nunca podemos saberlo.

La teoría moderna de la mecánica cuántica supone mucho más que unos vagos razonamientos sobre la exactitud de las mediciones y sobre el movimiento ondulatorio. Es una teoría matemática exacta, capaz de detalladas predicciones sobre el comportamiento de los sistemas subatómicos. Importantes propiedades físicas, tales como el principio de incertidumbre de Heisenberg, están incrustadas en el nivel básico de la teoría y surgen, con toda naturalidad, de las matemáticas. Concretamente, el físico austríaco Erwin Schrödinger descubrió en 1924 la ecuación matemática que rige el movimiento

de las enigmáticas ondas probabilísticas, y en la actualidad los físicos profesionales llevan a cabo cálculos prácticos que revelan la estructura interna y el movimiento de los átomos y las moléculas aplicando esta ecuación. Por ejemplo, se calculan los niveles energéticos de los átomos y, en consecuencia, las frecuencias de la luz que emiten y absorben, al mismo tiempo que la intensidad relativa de los distintos colores. Estos cálculos permiten que espectros hasta ahora misteriosos, como los de los objetos astronómicos lejanos, se identifiquen con productos químicos conocidos. Lo cual tiene una especial importancia en el caso de objetos muy lejanos, como los quásares, porque la luz que llega hasta nosotros ha sufrido un enorme corrimiento hacia el rojo debido a la expansión del universo, y podría consistir en radiaciones invisibles para nosotros, por pertenecer a la región ultravioleta, de no haberse producido el corrimiento. Los cálculos permiten predecir espectros de todas las frecuencias.

Otros cálculos revelan la naturaleza de las fuerzas interatómicas que ayudan a mantener los átomos unidos formando moléculas.

Cuando dos átomos se acercan, sus ondas materiales comienzan a superponerse y se producen importantes efectos de interferencia que dan lugar a que los átomos se adhieran mediante un enlace químico. Cuando son muchos los átomos que se juntan en un orden regular, como ocurre en los cristales, las ondas de todos los electrones son constreñidas a seguir un movimiento periódico coordinado que les permite atravesar grandes espesores de materia

con poca resistencia. El estudio de estas ondas electrónicas aporta información sobre cómo conducen la electricidad y el calor los metales. Detallados cálculos, realizados con ayuda de la teoría cuántica, nos han dado una idea de la estructura de los cristales y de otros materiales sólidos, como los semiconductores, a la vez que han sentado las bases para la comprensión de los líquidos, los gases, los plasmas y los superfluidos.

También en el terreno nuclear, la aplicación de los cálculos matemáticos derivados de la mecánica cuántica aporta mucha información sobre la estructura nuclear interna, las reacciones nucleares como la fisión y la fusión, y la interacción de los núcleos con otras partículas subatómicas.

Las matemáticas en cuestión no son del tipo habitual basado en la aritmética; operan con objetos matemáticos abstractos que obedecen a reglas de combinación muy peculiares y que tienen propiedades absolutamente distintas de las de los números ordinarios. Aunque el conocimiento pormenorizado de estas matemáticas requiere muchos años de estudio, algo de su sabor puede transmitirse utilizando ideas elementales. Como siempre ocurre en la ciencia, las matemáticas son un modelo que debe imitar el comportamiento del mundo real. En la época pre cuántica, el estado de un sistema físico se representaba mediante un conjunto de números. Por ejemplo, el estado de un cuerpo se define por su posición, su velocidad, su velocidad de rotación, etc., en cada instante. Midiendo estas cantidades, se obtienen números

concretos. El modo en que los números de un instante se relacionan con los de otros instantes lo proporcionan las llamadas ecuaciones diferenciales.

En contraposición, la teoría cuántica nos prohíbe asignar números determinados a todos los atributos de un cuerpo simultáneamente: no podemos especificar al mismo tiempo, por ejemplo, la posición y el impulso. Además, no hay una trayectoria única y bien definida, sino muchos trayectos posibles. El estado del sistema debe reflejar estas incertidumbres y ambigüedades, y el acto de medir, que perturba el sistema cuántico de manera fundamental, no equivale al mero desvelamiento de los valores numéricos de las diversas magnitudes.

Una forma de representar el hecho de que una partícula puede existir en un estado cuántico susceptible de muchos comportamientos posibles —muchos mundos distintos— es recurrir al concepto de vector. Los vectores se conocen normalmente como magnitudes orientadas: la velocidad, la fuerza y la rotación son ejemplos de cantidades que tienen al mismo tiempo una magnitud (grande, pequeña, etc.) y una dirección (hacia el norte, en sentido vertical, etc.). Por el contrario, cantidades como la masa, la temperatura, la aceleración y la energía tienen todas ellas magnitud, pero no dirección.

Una importante propiedad de los vectores es la manera en que deben sumarse. A diferencia de los números, no se pueden sumar dos vectores sumando sus magnitudes, pues también deben tenerse

en cuenta las direcciones. Por ejemplo, si dos fuerzas se oponen, pueden anularse, aun cuando sus magnitudes valoradas por separado sean importantes.

Estas consideraciones hacen que las reglas para combinar vectores sean más complicadas que la aritmética, pero también las dota de una estructura más rica.

Así como la suma de vectores puede efectuarse de muchas maneras, según cuáles sean sus direcciones, un vector puede dividirse de muchos modos en otros vectores. Por ejemplo, se empuja un coche con mayor eficacia colocándose detrás del vehículo, pero también es posible moverlo, aunque con menos facilidad, mediante una presión oblicua. En realidad, sea cual sea el ángulo del empuje, alguna fuerza actuará en el sentido del movimiento, con tal de que el ángulo no sea exactamente perpendicular al automóvil. Los matemáticos dicen que el vector tiene un componente a lo largo del vehículo y otro perpendicular. Según el ángulo con que se empuje, la componente paralela dispone de mayor o menor cantidad de la fuerza total que la componente perpendicular. Así pues, el vector (el empuje) puede descomponerse en dos vectores: uno paralelo al coche y otro perpendicular, de distintas proporciones que dependen del ángulo. Si el ángulo es casi paralelo al vehículo, la componente paralela retiene la mayor parte de la fuerza y es mucho mayor que la fuerza lateral, de tal modo que ésta es la posición en que el empuje resulta más eficaz (véase también la Figura 16).

La idea de que el vector se descompone en dos vectores

perpendiculares entre sí se utiliza de una forma curiosa en la teoría cuántica. Cada uno de los mundos posibles, es decir, cada uno de los comportamientos o trayectorias potenciales de una partícula, se considera un vector; no un vector en el espacio ordinario, sino una magnitud abstracta en un espacio abstracto. Cada vector es perpendicular a todos los demás vectores, de manera que todos los mundos son distintos y ninguno tiene componente alguna en otro mundo. El número de vectores necesario, y de ahí el número de dimensiones del espacio, depende del número de trayectorias posibles. Recordando la analogía de las trayectorias en el parque descrita en la Figura 3, sería necesario utilizar una infinidad de mundos posibles, lo mismo que hay un número ilimitado de posibles trayectos por el parque. Esto exige un espacio vectorial de infinitas dimensiones: tal cosa no se puede visualizar, pero matemáticamente tiene sentido. Equipados con este espacio vectorial, los físicos describen el estado del sistema cuántico como un vector en el espacio que en general puede apuntar hacia cualquier ángulo. Si se sitúa a lo largo de uno de los vectores correspondiente a un determinado mundo, cualquier observación mostrará que el sistema tiene exactamente el estado concreto correspondiente a ese mundo, pero si tiene una posición intermedia entre los vectores de dos mundos, entonces, al igual que la fuerza que se ejerce sobre el coche, tendrá componentes en ambos. El que cuente con la componente mayor será el mundo más probable y el otro, un mundo alternativo, pero menos probable. Por supuesto, de

existir varias alternativas, el vector puede tener componentes en todas ellas, y esto sigue siendo cierto aun cuando su número sea infinito. El ángulo del vector determina cuáles son los favorecidos, es decir, las alternativas más probables (véase Figura 9).

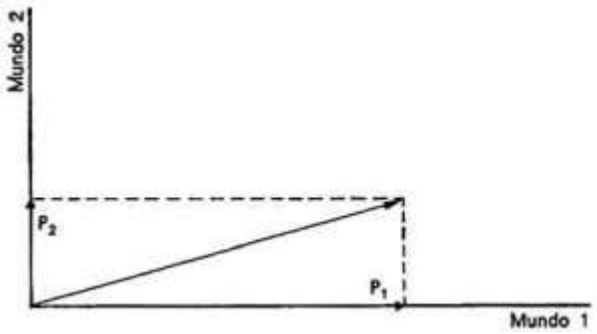

Figura 9. Superposición de mundos. Las flechas perpendiculares representan mundos alternativos (por ejemplo, el electrón pasa por la ranura 1 o por la ranura 2). La flecha oblicua representa el estado cuántico que se proyecta en ambas posibilidades. Puesto que P_1 es mayor que P_2 hay mayores probabilidades de que resulte existir el mundo 1 al hacer una medición. Si el mundo 1 se observa en la realidad, repentina y misteriosamente el vector oblicuo se reduce a la flecha horizontal.

Cuando se hace una observación, el sistema objeto de estudio, por ejemplo, un átomo, se encontrará evidentemente en un estado concreto, por ejemplo, en el nivel energético mínimo. Esto significa que el estado original, que puede ser una superposición de distintos mundos alternativos, de repente se lanza o proyecta hacia una alternativa concreta, un misterioso salto que examinaremos detalladamente en el capítulo 7. En lenguaje vectorial, esto significa

que el acto de la observación hace que el vector gire de repente desde alguna posición intermedia en el espacio abstracto a una nueva posición donde se sitúa exactamente en paralelo al vector que representa el mundo que efectivamente observamos. Este súbito salto de estado, o rotación del vector, refleja el hecho de que la observación perturba inevitablemente el estado del sistema, como se ha explicado antes en este mismo capítulo. Por tanto, desde el punto de vista matemático, medir una magnitud equivale a rotar súbitamente el vector en el espacio abstracto.

La rotación proporciona otro ejemplo de magnitud que no obedece las reglas de la aritmética. También las rotaciones tienen magnitud (2°, 55°, un ángulo recto, etc.) y dirección (en el sentido de las agujas del reloj, de norte a sur, etc.), pero sumar rotaciones es algo aún más complejo que sumar vectores como fuerzas, si las direcciones son distintas. En tal caso, no sólo debemos tener en cuenta el ángulo entre las rotaciones, sino también el orden en que se agregan.

Cuando se suman números, no es necesario tener en cuenta el orden de adición (por ejemplo, 1 + 2 = 2 + 1), pero las rotaciones no gozan de esta simetría. Un único ejemplo, que el lector fácilmente puede comprobar, consiste en rotar este mismo libro. Colóquelo abierto sobre una mesa en la posición normal de leer y voltéelo en ángulo recto y alejándolo de usted, de modo que quede invertido y vertical. Ahora gírelo 90° en el sentido de las agujas del reloj. Si las dos operaciones anteriores se realizan en orden inverso —la rotación

en el sentido de las agujas del reloj primero y luego la elevación— el libro no quedará en la misma posición. En realidad, quedará apoyado en el lateral en lugar de hacerlo en la parte superior. El ejemplo sirve para ilustrar el principio general de que las rotaciones no se ajustan a las habituales reglas de la aritmética, de modo que no pueden describirse mediante números cuyo orden de adición no importe.

Estas ideas encajan de manera natural con el esquema cuántico porque la rotación del vector de estado corresponde, como antes hemos dicho, a una medición, y el orden en que se hacen dos mediciones afectará al resultado. Por ejemplo, si medimos la posición de una partícula, destruimos todo conocimiento sobre su movimiento. Si a continuación medimos el movimiento, la posición resulta absolutamente incierta. Cuando las mediciones se realizan en orden inverso —primero el movimiento y después la posición— desembocamos en una partícula en un estado con movimiento absolutamente incierto, que no es el mismo estado final que resulta haciéndolo en el otro orden. Así pues, el orden de las observaciones, que se refleja en el orden de rotación del espacio vectorial abstracto, es de vital importancia para el resultado. Este rasgo es fundamental para la teoría cuántica, que debe utilizar los adecuados objetos matemáticos, que no obedecen a la regla 1 + 2 = 2 + 1 de la aritmética elemental.

Estas potentes herramientas matemáticas revelan una nueva física. Exactamente igual que al rotar horizontalmente un vector se afectan

sus componentes horizontales, pero permanece inalterada su proyección vertical, así también resulta que ciertas cantidades son «perpendiculares» a otras y pueden realizarse mediciones de unas sin afectar a las demás; por ejemplo, es posible medir simultáneamente el «spin» (momento angular intrínseco) y la energía de una partícula. El análisis matemático descubre qué cantidades están ligadas a otras por la propiedad de incompatibilidad de rotación. Éstas, por tanto, cumplen las relaciones de incertidumbre del modelo de Heisenberg. Además de la posición y el impulso, otros ejemplos importantes son la energía y el tiempo. No es posible medir con absoluta precisión una cantidad de energía a menos que se disponga de una cantidad infinita de tiempo, característica ésta que resultará ser de fundamental importancia.

La mayor parte de este capítulo lo hemos dedicado a la curiosa dualidad onda-partícula de los electrones, pero tales consideraciones valen igualmente para toda la materia microscópica. Desde la Segunda Guerra Mundial se han descubierto cientos de distintos tipos de partículas subatómicas, todas las cuales se rigen por las reglas de la mecánica cuántica. En realidad, incluso los átomos enteros presentan los mismos rasgos de las interferencias de ondas. No hay ninguna escala de tamaño por encima de la cual la materia cuántica se convierta en materia «ordinaria» en el sentido newtoniano.

Las bolas de billar, las personas, los planetas, las estrellas, el universo entero... son en último término una masa de sistemas

mecánicos cuánticos, lo que implica que la vieja imagen newtoniana del universo mecánico que se mueve según un absoluto determinismo es falsa. En el mundo cotidiano, los fenómenos cuánticos son demasiado pequeños para que los percibamos; no vemos las propiedades ondulatorias de los balones de fútbol, por ejemplo, porque su longitud de onda es más de diez mil billones de veces menor que un núcleo. Sin embargo, el mundo real es un mundo cuántico, con todas las inmensas consecuencias que esto supone.

Para que no tengamos la sensación de que las misteriosas ondas de la materia están demasiado alejadas de la experiencia diaria para tener ninguna significación concreta, o bien que son tan sólo una invención disparatada del pensamiento científico, debemos darnos cuenta de que en la actualidad se han convertido en parte de la ingeniería aplicada. El microscopio de electrones, un instrumento capaz de conseguir enormes ampliaciones, basa su funcionamiento en ondas de electrones que sustituyen a las luminosas. Controlando la velocidad del haz de electrones se puede manipular la longitud de onda, obteniéndose con facilidad longitudes de onda mucho menores que los de la luz visible, lo que permite observar detalles a una escala mucho menor. De modo que las curiosas formas de Davisson, de tan fructíferas consecuencias para la naturaleza del universo, tienen un impacto más prosaico, pero también más tangible, en nuestras vidas.

Capítulo IV
Los extraños mundos de los cuantos

Debemos, pues, reconocer que el microcosmos no está regido por leyes deterministas que regulen con exactitud el comportamiento de los átomos y de sus componentes, sino por el azar y la indeterminación.

Así, una partícula como el electrón tiene un comportamiento ondulatorio, a la vez que las ondas electromagnéticas también presentan características corpusculares. No existe contrapartida cotidiana a la dualidad «onda-partícula», de manera que el microcosmos no es una mera versión liliputiense del macrocosmos, sino algo cualitativamente distinto, casi paradójicamente distinto. En este extraño mundo de los cuantos, la intuición nos abandona y pueden ocurrir cosas aparentemente absurdas o milagrosas. En este capítulo examinaremos algunas de las consecuencias de la teoría cuántica y describiremos la naturaleza verdaderamente insustancial del, en apariencia, concreto mundo de la materia.

El principio de incertidumbre de Heisenberg pone restricciones a la exactitud con que se puede determinar la localización y el movimiento de las partículas, pero estas dos magnitudes no son las únicas que pueden medirse. Por ejemplo, podríamos estar más interesados por la velocidad del «spin» de un átomo o por su orientación.

O bien, podríamos necesitar medir su energía o el tiempo que tarda

en pasar a un nuevo estado energético.

Es posible analizar las observaciones de estas magnitudes de la misma manera que se utilizó el microscopio de rayos gamma, descrito en el capítulo anterior, para estimar la incertidumbre de la posición y del impulso.

Para ilustrar estas nuevas posibilidades, supongamos que queremos determinar la energía de un fotón de luz. De acuerdo con la hipótesis cuántica original de Planck, la energía de un fotón es directamente proporcional a la frecuencia de la luz: al doble de frecuencia corresponde el doble de energía. Un procedimiento práctico de medirla consiste, pues, en medir la frecuencia de la onda luminosa, lo que puede hacerse contando el número de oscilaciones (es decir, de crestas y vientres de la onda) que pasan en un determinado intervalo de tiempo. Para la luz visible es grandísimo: alrededor de mil billones por segundo. Para que la operación tenga éxito es menester evidentemente que al menos se produzca una oscilación de la onda, y a ser posible varias, pero cada oscilación requiere un intervalo de tiempo determinado. La onda debe pasar desde la cresta al vientre y de nuevo a la cresta. Medir la frecuencia de la luz en una fracción de tiempo inferior a ésta es a todas luces imposible, incluso en teoría. En el caso de la luz visible, la duración necesaria es muy breve (una milbillonésima de segundo). Las ondas electromagnéticas con longitudes de onda mayores y menor frecuencia, tales como las ondas radiofónicas, pueden precisar algunas milésimas de segundo para cada

oscilación. Consiguientemente los fotones de las ondas de radio tienen muy poca energía. Por el contrario, los rayos gamma oscilan centenares de veces más de prisa que la luz y la energía de sus fotones es cientos de veces mayor.

Estas sencillas consideraciones ponen de manifiesto que existe una fundamental limitación de la exactitud con que puede medirse la frecuencia, y por tanto la energía, en un intervalo dado de tiempo. Si la duración es menor que un ciclo de la onda, la energía queda muy indeterminada, por lo que hay una relación de incertidumbre que vincula la energía y el tiempo que es idéntica a la relación ya expuesta entre posición e impulso. Para conseguir una exacta determinación de la energía, es necesario hacer una larga medición, pero si lo que nos interesa es el momento en que sucede un acontecimiento, entonces una determinación exacta sólo puede hacerse a expensas del conocimiento sobre la energía. Hay aquí, pues, un equilibrio entre información sobre la energía e información sobre el tiempo similar a la mutua incompatibilidad entre la posición y el movimiento. Esta nueva incertidumbre tiene consecuencias de lo más espectaculares.

Antes de volver a cuestiones de mayor amplitud, debemos subrayar un punto importante. La limitación de las mediciones de la energía y del tiempo, al igual que las de la posición y el impulso, no son meras insuficiencias tecnológicas, sino propiedades categóricas e inherentes de la materia. En ningún sentido cabe imaginar un fotón que «realmente» posea en todos los momentos una energía bien

definida, aun cuando nos sea imposible medirla, ni tampoco un fotón que surja en un determinado momento con una frecuencia concreta. La energía y el tiempo son características incompatibles para los fotones, y cuál de las dos se ponga de manifiesto con mayor exactitud depende por completo de la clase de las mediciones que elijamos efectuar.

Vislumbramos ahora, por primera vez, el asombroso papel que el observador desempeña en la estructura del microcosmos, pues los atributos que poseen los fotones parecen depender precisamente de las magnitudes que el experimentador decida medir. Además, la relación de incertidumbre energía-tiempo, como la de la posición-impulso, no se limita a los fotones, sino que es válida para toda la actividad subatómica.

Una consecuencia inmediatamente perceptible de la relación de incertidumbre energía-tiempo se refiere a la calidad de la luz que emiten los átomos. Como se ha mencionado, los colores que irradian las distintas sustancias vienen determinados por el espaciado de los niveles atómicos de energía, y esto permite a los físicos identificar los distintos productos químicos con la mera observación de su espectro luminoso. Un típico espectro, por ejemplo, de un tubo fluorescente lleno de gas, presenta una serie de rayas bien marcadas que representan las distintas frecuencias (es decir, las energías) de la luz que emana ese tipo de átomos. Cada raya la producen fotones con una energía determinada que se emiten cuando los electrones de los átomos de gas saltan de los niveles

superiores a los inferiores.

Hay en estas rayas un importante detalle que ilustra maravillosamente la relación de incertidumbre energía-tiempo. La emisión de un fotón individual ocurre cuando un electrón es empujado (por ejemplo, por una corriente eléctrica) a un nivel energético superior, de modo que el átomo pasa transitoriamente por un estado de excitación. Pero el estado de excitación sólo en parte es estable y pronto los electrones vuelven al estado más cómodo de baja energía.

La duración del estado de excitación depende de varios factores, como son la distribución de los demás electrones y la diferencia energética entre los estados, y oscila enormemente entre una millonésima de billonésima de segundo y una milésima de segundo e incluso más. Si la duración es muy corta, entonces la relación de incertidumbre tiempo-energía exige que la energía de los fotones emitidos no esté muy bien definida. Desde el punto de vista del observador, esto significa que una masa de átomos idénticamente excitados no producirá, al retornar a su estado anterior, fotones idénticos. Por el contrario, la masa de fotones variará en cuanto a energía y por tanto en frecuencia. Al mirar la luz de millones de átomos, el observador no ve un color exactamente definido, sino una mancha de color concentrada alrededor del centro de la raya espectral. Las mismas rayas, por tanto, no son del todo claras, sino de bordes borrosos, y su anchura está directamente relacionada con la duración del estado de excitación atómica. Así pues, un estado de

corta duración da una raya ancha debido a que los fotones tienen una energía muy incierta, mientras que una raya estrecha indica una larga duración y una cantidad de energía bastante definida.

Midiendo el ancho de las rayas los físicos pueden deducir la duración del correspondiente estado de excitación.

Una de las consecuencias más notables de la relación de incertidumbre energía-tiempo es la transgresión de una de las más apreciadas leyes de la física clásica. En la vieja teoría newtoniana de la materia, la energía se conserva rigurosamente. No hay manera de crear ni de destruir energía, si bien pueden transformarse de una a otra forma. Por ejemplo, un hornillo eléctrico transforma la energía eléctrica en calor y luz; una máquina de vapor transforma la energía química en energía mecánica, y así sucesivamente. Cualquiera que sea el número de veces en que se transforme o divida, sigue habiendo la misma cantidad total de energía. Esta ley fundamental de la física ha desmantelado todos los intentos de inventar el perpetuum mobile —la máquina que funcione sin combustible—, pues es imposible sacar energía de la nada.

En el terreno cuántico, la ley de la conservación de la energía resulta discutible. Afirmar que la energía se conserva nos obliga, al menos en principio, a poder medir con exactitud la energía que hay en un momento y en el siguiente, para comprobar que la cantidad total se ha mantenido invariable. Sin embargo, la relación de incertidumbre energía-tiempo exige que los dos momentos en que se comprueba la energía no deban ser demasiado próximos, o bien

habrá cierta indeterminación en cuanto a la cantidad de energía. Esto abre la posibilidad de que en períodos muy breves la ley de la conservación de la energía pudiera quedar en suspenso. Por ejemplo, podría aparecer energía espontáneamente en el universo, siempre que volviera a desaparecer durante el tiempo que concede la relación de incertidumbre. Hablando en términos pintorescos, un sistema puede «tomar prestada» energía según un arreglo bastante especial: la debe devolver en un plazo muy breve. Cuanto mayor es el préstamo, más rápida ha de ser la devolución. A pesar del limitado plazo del préstamo, veremos que durante su duración es posible hacer cosas espectaculares con la energía prestada.

Dado que nos ocupamos de sistemas subatómicos, las cantidades de energía en cuestión son muy pequeñas para los estándares cotidianos. No hay posibilidad, por ejemplo, de hacer funcionar una máquina a base de energía prestada, como era la ilusión de los inventores medievales. La energía que emite una luz eléctrica en un segundo sólo puede ser tomada prestada, gracias al principio de incertidumbre, durante una billonésima de billonésima de billonésima de segundo. Dicho de otro modo, el mecanismo de préstamo cuántico sólo asciende a una fracción de la emisión de una lámpara eléctrica correspondiente a un uno seguido de treinta y seis ceros.

En el terreno subatómico las cosas son distintas porque las energías son mucho menores que en la vida diaria y hay tanta actividad que incluso períodos de tiempo que son absolutamente diminutos para

nosotros permiten que ocurran muchas cosas. Por ejemplo, la energía necesaria para elevar un electrón a un estado atómico excitado es tan pequeña que puede tomarse prestada durante varias milésimas de billonésimas de segundo. Puede que parezca tratarse de un período no muy largo, pero permite importantes efectos. Si un fotón encuentra un átomo, puede ser absorbido, provocando que el átomo se excite al pasar un electrón a un nivel energético superior. Si el fotón no tiene la bastante energía para elevar el electrón, el déficit puede tomarse prestado, lo que permite que la excitación ocurra temporalmente. Si el déficit energético no es demasiado grande, el préstamo puede ser bastante largo, tal vez de una mil billonésima de segundo. Este tiempo es lo bastante largo para que el electrón gire alrededor del átomo y en cualquier caso es comparable a la duración del estado de excitación. El resultado es que, cuando se devuelve el préstamo y el fotón es re emitido, el átomo ha estado excitado el suficiente tiempo para reordenar su forma, de manera que el fotón emitido no lo será en la misma dirección del primero. Esto cabe describirlo diciendo que el fotón entrante ha sido desviado por el átomo hacia otra dirección.

Cuanto más se aproxima el fotón a la energía exacta necesaria para elevar el electrón al estado de excitación, menor es el préstamo y mayores la duración y el efecto dispersante. Puesto que la energía es proporcional a la frecuencia, que a su vez es una medida del color de la luz, de ahí se deduce que los distintos colores se dispersarán en distinto grado. Por eso, hay materiales que son transparentes a

unos colores y no a otros, de manera que se ven coloreados al mirar a su través. La dispersión preferencial de la luz de frecuencia alta explica por qué el cielo es azul: la luz blanca del sol contiene muchas frecuencias entremezcladas. Las frecuencias altas corresponden a los colores como el azul y el violeta, las frecuencias bajas al verde y el rojo.

Cuando la luz del sol choca con los átomos del aire en la alta atmósfera, parte de la luz azul se desperdiga coloreando el cielo y la restante luz, a la que se le ha robado su azul, es rica en frecuencias bajas, por lo que parece amarilla.

Esta es la razón de que el Sol sea de color amarillo. Cuando se ve cerca del horizonte, la mayor profundidad de la capa de aire que atraviesa la luz multiplica este efecto, aumentando la disipación de las frecuencias bajas, y el Sol adopta un color rojizo.

A manera de ilustración adicional de la incertidumbre energética, examinemos el problema de hacer rodar una bola sobre un montículo. De impulsarla con poca energía, la bola alcanza sólo parte de la altura del montículo, donde se detiene y rueda de vuelta. Por otra parte, de lanzarla con mucha energía la bola conseguirá llegar hasta la cumbre del montículo, donde comenzará a rodar hacia abajo por el lado opuesto. Se plantea entonces el problema de si la bola puede tomar prestada la suficiente energía, mediante el mecanismo de préstamo de Heisenberg, para superar el montículo aun cuando haya sido lanzada a muy poca velocidad.

Para comprobar estas ideas se puede estudiar el comportamiento de

los electrones, que hacen el papel de bolas, cuando entran en el campo de una fuerza eléctrica que actúa lo mismo que un montículo desacelerando el ascenso de los electrones. Si se disparan electrones contra esta barrera electrónica se comprueba efectivamente que algunos atraviesan la barrera, incluso cuando la energía de lanzamiento es muy inferior a la que necesitan para superar el obstáculo según las consideraciones extra cuánticas. Si la barrera es delgada y no demasiado «alta», la energía necesaria pueden tomarla prestada los electrones durante el breve período de tiempo necesario para que los electrones se desplacen a través de ella. Por tanto, el electrón aparece al otro lado de la barrera, aparentemente habiéndose abierto paso a su través. Este llamado efecto túnel, como todos los fenómenos controlados por la teoría cuántica, es de naturaleza estadística: los electrones tienen una cierta probabilidad de atravesar la barrera. Cuanto mayor sea el déficit energético, más improbable es que el principio de incertidumbre les sirva de fiador. En el caso de una bola real que pese unos cien gramos y de un montículo de diez metros de altura y diez metros de espesor, la probabilidad de que la bola se abra paso a través del montículo cuando todavía está a un metro de la cima es sólo una entre un uno seguido de un billón de billones de billones de ceros. Aunque irrelevante para los objetos macroscópicos, el efecto túnel es vital para algunos procesos subatómicos. Uno de estos procesos es la radioactividad. El núcleo del átomo está rodeado de una barrera similar a un montículo, provocado por la competencia entre la

repulsión eléctrica y la atracción nuclear. Las partículas que forman parte del núcleo, como los protones, son fuertemente repelidas por las cargas eléctricas de todos los protones vecinos, pero habitualmente no son expulsadas del núcleo debido a que la fuerza eléctrica es superada por fuerzas atractivas mayores que mantienen el núcleo unido. No obstante, estas últimas tienen un alcance muy reducido y desaparecen por completo fuera de la superficie del núcleo. De ahí se sigue que, si un protón fuera apartado a una corta distancia del núcleo y dejado en libertad, sería lanzado hacia fuera a gran velocidad por el campo eléctrico, siendo impotente para impedirlo la fuerza nuclear, como consecuencia de su aislamiento del núcleo.

Las emanaciones de alta velocidad de núcleos atómicos radiactivos fueron descubiertas por Henri Becquerel en 1898 y denominadas rayos alfa. Pronto se descubrió que en absoluto eran rayos, sino partículas; en realidad son cuerpos compuestos que constan de dos protones unidos con dos neutrones. La explicación del escape de las partículas alfa de los núcleos radiactivos se basa en el efecto túnel. La partícula alfa, cuando está dentro del núcleo, no tiene la suficiente energía para superar los lazos de la fuerza nuclear que mantiene unidos las partículas. Permanece atrapada en el núcleo por una barrera de fuerza que no puede sobrepasar. Sin embargo, tomando energía prestada durante tan sólo una millonésima de billonésima de segundo —que es lo que tarda una partícula alfa en recorrer las diez millonésimas de millonésima de centímetro de la

superficie nuclear—, la partícula puede escapar. En un préstamo de tan corta duración, la energía que se toma prestada es comparable a la energía que existe en la partícula alfa, de modo que su comportamiento sufre una profunda modificación.

Atraviesa la barrera y aparece del otro lado, donde la fuerza eléctrica libre de trabas, la lanza a enorme velocidad convirtiéndola en un rayo alfa. En todo núcleo donde esto sea posible, hay una cierta probabilidad de que, tras un determinado tiempo, se produzca una emisión alfa. Así, en una gran masa de átomos radiactivos, al duplicarse este tiempo se producirán el doble de emisiones. Por tanto, toda materia radiactiva tiene una determinada vida media contra la desintegración, cuya duración depende sensiblemente del tamaño y el espesor de la barrera que constituye la fuerza nuclear.

Un comportamiento igual de notable presentan las partículas cuya energía excede la necesaria para superar la barrera. Debido a la naturaleza ondulatoria de la materia, algunas ondas se reflejan en la barrera, por mucha energía que tenga la partícula. Esto implica una determinada probabilidad de que la partícula rebote en una barrera por mínima que ésta sea. De hecho hay una probabilidad, aunque increíblemente pequeña, de que una bala rebote al chocar contra una hoja de papel.

A comienzos de la década de 1930, la teoría cuántica se combinó con la relatividad especial, gracias en gran medida a la obra de Paul Dirac, e inmediatamente abrió nuevos horizontes. Hasta entonces, las ecuaciones que utilizaban los físicos para describir las ondas de

la materia, las ecuaciones de Schrödinger, eran matemáticamente inconsistentes con el principio de la relatividad especial. Dirac buscaba unas ecuaciones sustitutivas, pero encontró que no se podía conseguir una fórmula satisfactoria utilizando los tipos de objetos matemáticos entonces conocidos. Le fue necesario inventar un nuevo tipo de magnitud, llamada «spinor», que permitiera a sus ecuaciones las simetrías adicionales inherentes a la teoría de la relatividad. La ecuación de Dirac predice en general resultados que se diferencian poco de los de la anterior ecuación no-relativista. Pero de ella surgieron dos rasgos nuevos y de profunda significación.

El primero se refiere al comportamiento de las partículas cuando se las somete a rotación. Las leyes de la mecánica cuántica hacen predicciones concretas sobre el comportamiento de los cuerpos que se mueven siguiendo trayectorias curvas, tales como órbitas circulares. Dirac descubrió que para que estas leyes se sostengan es preciso suponer que la propia partícula e de alguna manera rotando (en inglés «spinning», de donde el nombre de «spinor»). El movimiento del electrón alrededor del átomo, por ejemplo, se parece al de la Tierra (que también rota sobre su propio eje) yendo alrededor del Sol. La rotación intrínseca del electrón tiene un rasgo incómodo, sin embargo, que no presenta la rotación de la Tierra. Imagínese una bola que rota en el sentido de las agujas del reloj alrededor de un eje vertical. Si se voltea la bola de arriba abajo, rotará en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del

mismo eje vertical. Continuando el giro de la bola hasta completar los 360°, de vuelta a su posición original, volverá a girar en el sentido de las agujas del reloj.

Esta descripción parece tan evidente que uno tiende a darla por sentada y a suponer que se aplica también a los pequeños cuerpos rotatorios, incluidos los electrones.

Lo extraordinario es que los electrones sencillamente no vuelven a su situación anterior cuando se les da una vuelta entera. En realidad, necesitan dos revoluciones completas y sucesivas para volver a la misma posición. Es como si los electrones tuviesen una doble perspectiva del universo, un rasgo casi sin paralelo en los cuerpos macroscópicos y absolutamente misterioso desde el punto de vista de la experiencia cotidiana.

El origen de la doble naturaleza de los electrones afecta, durante las rotaciones, al comportamiento de la onda que llevan asociada.

Resulta que después de una sola revolución, la onda vuelve, por así decirlo, con las crestas y los vientres intercambiados, y sólo una segunda rotación restaura la configuración original. Todo esto indica que el movimiento giratorio interno de las partículas subatómicas tiene en realidad un carácter muy distinto al de la sencilla idea de una esfera rotatoria. Sin embargo, el «spin» intrínseco puede medirse en el laboratorio y, en realidad, se infirió su existencia a partir de unas curiosas líneas dobles muy concretas en el espectro atómico, antes de que Dirac llegase a su explicación. No todas las partículas subatómicas poseen esta peculiar rotación

de tipo Dirac, con su doble carácter. Hay partículas que en absoluto rotan y no presentan la doble imagen, mientras que otras tienen dos o cuatro unidades de «spin». No obstante, las partículas conocidas —electrones, protones y neutrones— que componen la materia ordinaria, son todas partículas de tipo Dirac, con el característico «spin».

El trabajo de Dirac dio lugar a otro sensacional resultado que es todavía más extraordinario que el «spin» intrínseco. Las consecuencias completas de la ecuación de Dirac no se extrajeron sino al cabo de años, pero desde el comienzo, en 1931, el propio Dirac se concentró en un rasgo simple pero peculiar de sus nuevas matemáticas. Como todos los físicos, Dirac consideraba que las ecuaciones eran algo a resolver y suponía que cada solución representaba la descripción de alguna situación física real. Así, por ejemplo, si se utilizaba la ecuación para estudiar el movimiento de un electrón que órbita alrededor de un núcleo de hidrógeno, entonces cada solución debía corresponder a un posible estado concreto de movimiento. Como era de esperar, la ecuación de Dirac poseía un número infinito de soluciones, una para cada nivel energético del átomo, y todavía más para los movimientos de los electrones energéticos que se mueven desligados de la atracción del núcleo de hidrógeno. Lo sorprendente fue, no obstante, el descubrimiento de todo un conjunto de soluciones adicionales que no tenían ninguna contrapartida física evidente. De hecho, a primera vista parecían carecer por completo de sentido. Para cada

solución de la ecuación de Dirac que describe un electrón con una energía dada, hay una especie de solución refleja que describe otro electrón con igual cantidad de energía negativa.

La energía, lo mismo que el dinero, se consideraba hasta entonces una cualidad puramente positiva. Un cuerpo posee energía si se mueve, si tiene carga eléctrica o si es excitado de cualquier otro modo. Probablemente sea posible extraer toda la energía de un cuerpo hasta dejarlo a cero de energía, pero ¿qué significa una energía inferior a cero? ¿Qué aspecto tendría y cómo se comportaría un cuerpo con energía negativa? Al principio, Dirac desconfiaba mucho de estas soluciones reflejas, cuya evidente interpretación era que se trataba de caprichos extra físicos —mero exceso de equipaje matemático— y no de descripciones del mundo real. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que cuando existe una solución matemática a una ley de la naturaleza, también suelen existir contrapartidas físicas. Dirac estudió qué ocurriría si estos curiosos estados de energía negativa fueran estados verdaderamente posibles de la materia. Se dio cuenta de que presentaban una gran paradoja, porque en apariencia permitían que cualquier electrón ordinario (es decir, de energía positiva) saltara a un estado de energía negativa mediante la emisión de un fotón. Entonces, lo que habitualmente suele considerarse el estado energético mínimo o estado fundamental de, pongamos, el átomo de hidrógeno ya no sería, a fin de cuentas, el estado mínimo, y habría que volver al problema clásico de cómo se evita que los átomos se colapsen. Además, no

hay límites al tamaño negativo de los estados de Dirac, de tal modo que toda la materia del universo amenaza con caer en un pozo sin fondo entre una infinita lluvia de rayos gamma.

Para evitar esta catástrofe, Dirac hizo una notable propuesta.

¿Qué pasaría si la materia ordinaria eludiera la caída infinita debido a que todos los estados de energía negativa estuvieran ya ocupados por otras partículas? El razonamiento que hay tras esta idea brota de un importante descubrimiento hecho por el físico alemán Wolfgang Pauli en 1925. Pauli estudió las propiedades de las partículas con «spin», pero no aisladas, sino colectivamente. La curiosa naturaleza doble del «spin» intrínseco está íntimamente relacionada con la manera en que dos o más de tales partículas responden a la proximidad de las demás. Como consecuencia de sus propiedades ondulatorias, dos electrones percibirán su mutua presencia, absolutamente al margen de la fuerza eléctrica que actúe entre ellos, porque las crestas y los vientres de la onda del uno se superpondrán e interferirán con las crestas y vientres del otro. Un estudio matemático de este efecto demuestra que existe un tipo de repulsión que evita que haya más de un electrón que ocupe en cada momento el mismo estado. Dicho de manera informal, dos electrones no pueden agolparse demasiado cerca. Es como si cada electrón poseyera una pequeña unidad de territorio que no puede ser invadido por sus semejantes.

El principio de exclusión de Pauli, como llegó a denominarse la propiedad territorial, conduce a algunos efectos importantes.

Implica que los electrones densamente apretados tengan una extraordinaria rigidez, puesto que la tendencia a la exclusividad les impide apretujarse en el mismo espacio.

Uno de los lugares donde la concentración de la materia es más feroz es el centro de las estrellas. El inmenso peso de las estrellas hace que sus núcleos se encojan bajo la gravedad de las enormes densidades, quizá de hasta mil millones de kilogramos por centímetro cúbico. Mientras continúan ardiendo, impiden una mayor contracción mediante la producción de grandes cantidades de calor que elevan la presión interior. En último término, empero, el combustible se va consumiendo y se produce una progresiva contracción hasta que los electrones empiezan a sentirse incómodos por la proximidad de sus vecinos. Entonces entra en juego el principio de Pauli que trata de impedir que la estrella continúe aplastándose. En las estrellas como el Sol, se tardará unos cinco millones de años más en llegar a tal estado, pero cuando se alcance las consecuencias serán espantosas. Las propiedades de esta materia ultra aplastada están predominantemente controladas por la actividad colectiva de los electrones. Un resultado de este principio de exclusividad es que el material estelar se comporta de manera extraña en presencia del calor. Al inyectar calor, en lugar de provocar que la materia se expanda y enfríe, el calor permanece atrapado, elevando la temperatura.

Si este proceso prosigue hasta el punto en que comienzan a arder nuevas reservas de combustible estelar, el calor contenido crece

súbitamente como en una olla a presión sobrecalentada y el núcleo de la estrella explota, en un paroxismo no lo bastante violento para deshacerla en fragmentos, pero sí lo bastante traumático para alterar drásticamente su estructura, pasando de ser una gran estrella roja y fría a ser una gigante azul muy caliente. Por último, todo el combustible se quema y una estrella como nuestro Sol acaba sus días encogiéndose hasta un tamaño como el de la Tierra, sostenida contra nuevos desmoronamientos por los electrones.

Otro lugar donde la rigidez entre los electrones desempeña un papel vital es el interior del átomo. Un gran átomo puede contener docenas de electrones orbitando alrededor del núcleo y, a primera vista, parece que todos ellos deberían desmoronarse hasta el mínimo de energía disponible. De ocurrir así, todos los electrones quedarían revueltos en estrecha proximidad y de forma caótica, y es dudoso que pudieran formarse tan siquiera enlaces químicos estables. Lo que en realidad se ha visto que sucede es que los electrones se apilan en ordenadas capas unos alrededor de los otros, evitando las capas inferiores el desmoronamiento de las superiores, de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli. Sin el juego de este principio, todos los átomos pesados se descompondrían en una masa informe.

Volviendo al problema de los estados de energía negativa de Dirac, el principio de Pauli ofrece una solución a la paradoja.

Al igual que a los electrones de un átomo se les impide caer a los niveles más bajos de energía al estar estos niveles ocupados por

otros electrones, también los simples electrones verían impedida su caída en el pozo sin fondo si el pozo ya estuviera lleno de electrones. La idea es sencilla, pero padece de un evidente defecto.

¿Dónde están todos esos electrones (y demás partículas) de energía negativa que bloquean el pozo? Al no tener éste fondo, sería menester un número infinito de partículas para rellenarlo. La respuesta de Dirac parece a primera vista poco convincente. Argumenta que este conjunto infinito de partículas es invisible, de modo que lo que normalmente nosotros consideramos el espacio vacío no está realmente vacío, sino lleno de un infinito mar de materia de energía negativa no detectada.

A pesar de lo que tiene de disparatada, la idea de Dirac cuenta con cierta capacidad de predicción. Examinemos, por ejemplo, cómo respondería uno de estos habitantes invisibles del espacio a la presencia de un fotón. Al igual que un electrón cualquiera, el electrón de energía negativa absorbe el fotón y utiliza su energía para saltar a un estado energético superior, siempre que haya espacio disponible. Si la energía del fotón es lo bastante grande, puede elevar directamente al electrón negativo fuera del pozo, colocándolo en un estado de energía positiva normal, donde hay mucho sitio. Tal acontecimiento sería presenciado por nosotros en forma de abrupta aparición de la nada de un nuevo electrón y la simultánea desaparición de un fotón. Puesto que el electrón con energía positiva es observable, la transición de la energía negativa a la positiva significa que el electrón sencillamente se materializa

saliendo del espacio vacío. Pero no es eso todo.

Deja tras de sí un agujero en el mar de energía negativa. Si bien la presencia de un electrón de energía negativa es invisible, su ausencia (es decir, el agujero) debe ser visible. La ausencia de energía negativa, de una partícula con carga negativa, debe aparecer ante nosotros como la presencia de una energía positiva, de una partícula con carga positiva. Así pues, junto al recién creado electrón habrá una especie de partícula espejo con carga eléctrica contraria, positiva.

Por tanto, la teoría de Dirac predice un tipo completamente nuevo de materia, actualmente denominada antimateria. Un fotón energético debe ser capaz de crear el par electrón-antielectrón o bien el par protón-antiprotón. En 1932, Carl Anderson, un físico norteamericano, descubrió un antielectrón (habitualmente llamado positrón) entre los residuos subatómicos de una lluvia de rayos cósmicos. Desde entonces se han producido en los laboratorios cientos de partículas de antimateria, confirmando espectacularmente la ecuación de Dirac.

Como se esperaba, la antimateria no sobrevive mucho tiempo. El hueco que queda en el mar de energía negativa será buscado por cualquier partícula de energía positiva situada por encima. Si un electrón ordinario encuentra tal agujero, desaparecerá en su interior y se desvanecerá del universo, emitiendo un rayo gamma como pago de su pérdida de energía. Este proceso es el inverso de la creación del par y se interpreta como que el encuentro de un electrón con un

positrón conduce a su mutua aniquilación. De manera que siempre que la materia y la antimateria se encuentran, el resultado es una desaparición explosiva.

La idea de que la materia se cree y se aniquile es una consecuencia de la teoría de la relatividad, que Dirac incorporó cuidadosamente a su ecuación. En el capítulo 2 vimos que si un cuerpo se acelera hasta cerca de la velocidad de la luz, se irá volviendo cada vez más pesado como procedimiento para impedir ser empujado más allá de la barrera de la luz.

El exceso de peso representa la conversión de la energía en masa, que a menor velocidad se dirigiría, por el contrario, a aumentar la velocidad del cuerpo. De ahí se deduce que la masa es, en realidad, una mera forma de energía encerrada. Por ejemplo, un protón contiene una billonésima de billonésima de gramo de masa, pero tan concentrada está esta energía enjaulada que incluso una cantidad de materia tan pequeña puede producir un destello de luz visible para el ojo humano a diez metros de distancia. La conversión de la energía en materia explica la súbita aparición de los pares partícula-antipartícula por el mecanismo de Dirac, estipulándose la cantidad de energía necesaria según la famosa fórmula de Einstein $E = mc2$. El proceso inverso, en el que la materia se convierte en energía, también ocurre en las bombas atómicas y en las centrales atómicas, así como en el Sol, cuya fuente de energía es la desaparición de cuatro millones de toneladas de masa por segundo.

Si la masa no es sino una forma de la energía, como sostiene

Einstein, entonces la energía, lo mismo que la masa, debe tener peso. ¿Qué ocurre con los cuatro millones de toneladas de materia solar que se pierden cada segundo? La respuesta es que se convierten en luz solar, de tal modo que un segundo de luz solar debe pesar cuatro millones de toneladas. ¿Cómo se puede comprobar esto? La cantidad total de luz solar que choca cada segundo contra la Tierra pesa la miseria de dos kilos, de tal modo que sería vano recoger la luz solar y pesarla.

Sorprendentemente, es mejor estrategia pesar la luz aún más débil de las estrellas lejanas. Utilizando la gravedad solar para aumentar el peso de la luz algo por encima de su peso en la Tierra, puede pesarse un rayo de luz estelar que roza el borde del Sol observando su combamiento por la gravedad solar. Esto es lo que hizo Eddington durante el eclipse solar de 1919.

Aunque resulte impresionante, la teoría de Dirac del mar de partículas invisibles de energía negativa resulta difícil de tragar literalmente. Los posteriores progresos matemáticos demostraron que en realidad su modelo sólo es heurístico y que la ecuación de Dirac requiere una nueva elaboración matemática para poder explicar globalmente la aparición y desaparición de la materia. En la teoría más moderna, la creación y la aniquilación de pares ocurre como antes, pero las dificultades que presentaban los estados de energía negativa no surgen en los mismos términos.

Cuando se combina la probabilidad de creación de un par de partículas con la relación de incertidumbre entre la energía y el

tiempo de Heisenberg, se hacen posibles algunos efectos nuevos y espectaculares. Sacar un electrón del mar de energía negativa y, en consecuencia, crear un par electrón-positrón exige un rayo gamma de energía igual, como mínimo, a $2mc^2$, el doble del segundo término de la ecuación de Einstein.

No obstante, esta cantidad bastante grande de energía puede tomarse prestada durante alrededor de una mil millonésima de billonésima de segundo, lo que permite al par electrón-positrón pasar transitoriamente por la existencia antes de volver a desvanecerse. Estos pares fantasmas llenan todo el espacio. Lo que nosotros solemos considerar como espacio vacío es, en realidad, un mar de incesante actividad, lleno de todas clases de materia no permanente; electrones, protones, neutrones, fotones, mesones, neutrinos y otras muchas más especies de materia, cada una de las cuales sólo existe durante ínfimas fracciones de tiempo. Para distinguir estos intrusos de las formas más permanentes de materia que todos conocemos, los físicos utilizan la palabra «virtual» para los primeros y «real» para las últimas.

Esta melée fantasmal no es una simple metáfora de los teóricos, pues las fluctuaciones de la ebullición pueden producir efectos cuantificables, incluso en los objetos cotidianos. Por ejemplo, el estado gelatinoso de determinadas pinturas procede de fuerzas moleculares inducidas por estas fluctuaciones del vacío. También es posible perturbar el vacío introduciendo materia. Una plancha de metal, que refleja la luz, también refleja los evanescentes fotones

virtuales del vacío. Atrapándolos entre dos placas paralelas es posible alterar ligeramente su energía, lo que produce una fuerza cuantificable en las placas. Estas nuevas posibilidades modifican drásticamente la imagen que tenían los físicos de las partículas subatómicas. El electrón, por ejemplo, ya no puede considerarse como un simple objeto puntual, pues está continuamente emitiendo y absorbiendo fotones virtuales a través del mecanismo de préstamo de energía de Heisenberg. Por tanto, cada electrón está envuelto en una nube de fotones virtuales y, si nos acercamos más, deducimos también la presencia de protones, mesones, neutrinos y todas las demás especies de partículas virtuales que zumban alrededor del electrón como un enjambre en acción. En realidad, todas las partículas subatómicas están revestidas de esta especie de elaborada y compleja capa de materia virtual.

A veces la nube virtual produce inesperados efectos físicos. Por ejemplo, el neutrón es una partícula eléctricamente neutra, como su mismo nombre indica, de modo que no transporta ninguna carga eléctrica.

No obstante, todo neutrón está revestido de una nube de partículas virtuales, parte de las cuales tienen carga eléctrica. Siempre estará presente el mismo número de cargas positivas y de negativas, pero éstas no han de estar necesariamente en el mismo lugar. Por tanto, existe la posibilidad de que un neutrón esté rodeado de capas de partículas virtuales con carga eléctrica, como son los mesones.

Por ello, cuando se dispara un electrón contra un neutrón,

desperdigará esta electricidad, lo que permitirá trazar un mapa de la distribución de la carga alrededor del neutrón. Además, al ser una partícula de tipo Dirac, el neutrón posee un «spin» intrínseco, lo que quiere decir que conforme rota arrastra a su alrededor estas capas cargadas, estableciendo minúsculas corrientes eléctricas. Estas corrientes crean un campo magnético medible en el laboratorio. Cuando se realizó esta medición por primera vez, en 1933, produjo consternación entre los físicos, que no contaban con que un objeto eléctricamente neutro tuviera campo magnético.

Podemos imaginar que cada partícula transporta consigo todo un séquito de partículas virtuales.

Ninguna de las partículas virtuales vive lo bastante para adquirir el título de entidad independiente, pues pronto es reabsorbida por su progenitor. A su vez, cada partícula virtual transporta su propia sub nube de otras partículas virtuales cuya existencia es aún más evanescente, y así sucesivamente hasta el infinito. Si, por la razón que fuera, el vehículo progenitor desapareciera, las partículas virtuales no podrían ser absorbidas y serían promocionadas a reales. Esto es lo que ocurre cuando la materia encuentra a la antimateria; por ejemplo, cuando un protón tropieza con un antiprotón, ambos desaparecen de repente y quedan algunos mesones, o quizá fotones, de la nube virtual que no tienen adónde ir. Por tanto, aparecen en el universo como nuevas partículas de materia real, una vez satisfecho su préstamo de Heisenberg, de una vez por todas, con la masa-energía del par protón-antiprotón

sacrificado.

Con ayuda de la relación de incertidumbre energía-tiempo se pueden explicar otros muchos fenómenos subatómicos. Uno de los problemas fundamentales de la microfísica es explicar cómo dos partículas se afectan mutuamente por medio de una fuerza eléctrica.

Antes de la teoría cuántica, los físicos imaginaban que cada partícula cargada estaba envuelta en un campo electromagnético que actuaba sobre las demás partículas cercanas dando lugar a una fuerza.

Cuando la teoría cuántica demostró que las ondas electromagnéticas están confinadas en los cuantos, se intentó describir todos los efectos del campo electromagnético en función de los fotones. No obstante, cuando dos electrones se repelen mutuamente, no hay necesidad de que participe ningún fotón visible, y la explicación hubo de esperar hasta que se desarrolló la noción de partícula o cuanto virtual en la década de 1930. La fuerza eléctrica de atracción y de repulsión se entiende ahora de la siguiente manera.

Cada electrón está rodeado de una nube de fotones virtuales, cada uno de los cuales sólo vive transitoriamente de la energía que toma prestada antes de ser reabsorbido por el electrón. Cuando se acerca otra partícula cargada, surge sin embargo una nueva posibilidad. Una de las partículas podría crear un fotón virtual que podría ser absorbido por la otra. El análisis matemático revela que este

intercambio de fotones virtuales produce de hecho una fuerza entre las partículas que posee exactamente las mismas características que cabe esperar de un campo magnético.

Tras el éxito de explicar satisfactoriamente las fuerzas eléctricas (y magnéticas) en función del intercambio de fotones, se planteó el problema de si las demás fuerzas de la naturaleza —las fuerzas de la gravedad y del núcleo— no se podrían describir de manera similar. La cuantización de la gravedad es un tema importante que pospondremos para el próximo capítulo. El problema del origen de las fuerzas nucleares se resolvió a mediados de los años treinta. La fuerza nuclear fuerte que mantiene unidos a los componentes del núcleo (protones y neutrones) tiene una naturaleza absolutamente distinta que la fuerza electromagnética. En primer lugar, es varios cientos de veces mayor, pero aún más problemática es la forma en que varía con la distancia. La fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas disminuye lentamente conforme se alejan, de acuerdo con la llamada ley de la gravitación universal. Por el contrario, la fuerza nuclear no se altera mucho en distancias pequeñas, hasta que las partículas distan entre sí alrededor de una diez billonésima de centímetro, en que de repente desciende a cero. La abrupta desaparición de la fuerza nuclear en tan corto espacio es vital para la estructura y la estabilidad de los núcleos, pero significa que no puede explicarse por el intercambio de cuantos similares a los fotones virtuales.

La solución la encontró el físico japonés Hideki Yukawa en 1935.

Propuso que las partículas nucleares intercambiaban cuantos virtuales de un nuevo tipo de campo —el campo nuclear—; pero, a diferencia de los fotones virtuales, los cuantos de Yukawa poseen masa.

Cómo la presencia de la masa da lugar a una fuerza de extensión limitada puede comprenderse fácilmente a partir de la relación de incertidumbre energía-tiempo. De acuerdo con la ecuación de Einstein E = me2, la masa es una forma de energía y, como ya hemos visto, al crearse una masa se gasta una gran cantidad de energía. Para crear un cuanto virtual de Yukawa es necesario tomar prestada mucha más energía para poder dar lugar a la masa. En función del mecanismo de Heisenberg, la duración del préstamo debe ser proporcionalmente más corta, de modo que la distancia a que puede desplazarse la partícula virtual de Yukawa es muy limitada. Yukawa elaboró un tratamiento matemático completo y descubrió que la fuerza entre las dos partículas nucleares debe en realidad disminuir rápidamente al superar cierto límite. Como era de esperar, el límite guarda una relación simple con la masa del cuanto virtual y, utilizando el dato experimental de que la fuerza se desvanece alrededor de la diez billonésima de centímetro, Yukawa pudo determinar que la masa de su cuanto era de, más o menos, trescientas veces la masa de un electrón.

En este punto surgió una nueva e interesante posibilidad. Así como los fotones virtuales pueden promocionarse a reales por el sistema de aniquilar los electrones a que están vinculados, quizá también

fuera posible dar existencia independiente a las partículas virtuales de Yukawa si se aniquilaran las partículas del átomo a que estaban vinculadas. Por ejemplo, si un antiprotón choca con un protón, entonces, la abrupta y mutua desaparición de este par debería dar lugar a una lluvia de nuevas partículas. Yukawa llamó a éstas mesones, puesto que su masa se sitúa en algún punto intermedio entre la de los electrones y la de los protones. Unos diez años después se descubrieron los mesones de Yukawa, al igual que los positrones de Dirac, en los residuos subatómicos de los rayos X. En la actualidad, se producen de forma rutinaria, mediante la aniquilación de antiprotones y por otros muchos procedimientos, en los gigantescos aceleradores de partículas.

Aunque muchas de las ideas expuestas en este capítulo se han presentado de manera muy elemental y en realidad requieren un tratamiento matemático completo para hacerlas exactas y precisas, no obstante, sus consecuencias son importantes. El mundo en apariencia concreto que nos rodea resulta ser una ilusión cuando sondeamos los microscópicos escondrijos de la materia. Encontramos ahí un mundo cambiante, de transmutaciones y fluctuaciones, donde las partículas materiales pierden su identidad e incluso desaparecen por completo.

Lejos de ser un mecanismo de relojería, el microcosmos se disuelve en una especie de mundo caótico y evanescente donde la fundamental indeterminación de los atributos observables trasciende muchos de los más valiosos principios de la física

clásica. El afán por buscar una legalidad subyacente a toda esta anarquía subatómica es fuerte, pero, como veremos, en apariencia infructuoso. Tenemos que aceptar el hecho de que el mundo es mucho menos sustancial y fiable de lo que hasta ahora imaginábamos.

Capítulo V
Superespacio

En el terreno de los cuantos, el mundo en apariencia concreto de la experiencia se disuelve en el barullo de las transmutaciones subatómicas. El caos se sitúa en el corazón de la materia; cambios aleatorios, únicamente condicionados por leyes probabilísticas, dotan al tejido del universo de características parecidas a las de la ruleta. Pero, ¿qué puede decirse del propio terreno de juego donde se desarrolla esta partida de azar, el telón de fondo del espacio-tiempo sobre el que las partículas insustanciales e indisciplinadas de la materia llevan a cabo sus cabriolas? En el capítulo 2 vimos que el mismo espacio-tiempo no es absoluto o inmodificable tal como tradicionalmente se pensaba. También el espacio-tiempo tiene características dinámicas, que le hacen curvarse y distorsionarse, evolucionar y mutar. Estos cambios del espacio y del tiempo ocurren tanto localmente, en las vecindades de la Tierra, como globalmente conforme el universo se dilata al expansionarse. Los científicos han reconocido hace mucho tiempo que las ideas de la teoría cuántica deben aplicarse a la dinámica del espacio-tiempo a la vez que a la materia, hecho éste que da lugar a las más extraordinarias consecuencias.

Uno de los resultados más estimulantes de la teoría de la gravedad de Einstein —la llamada teoría de la relatividad generales la posibilidad de que haya ondas gravitatorias. La fuerza de la

gravedad es, en algunos aspectos, parecida a la fuerza eléctrica entre partículas cargadas o a la atracción entre imanes, pero con las masas desempeñando el papel de las cargas. Cuando las cargas eléctricas se alteran violentamente, como ocurre en los transmisores de radio, se generan ondas electromagnéticas. La razón de que ocurra esto es fácil de visualizar.

Si concebimos que la carga eléctrica está rodeada por un campo eléctrico, entonces cuando la carga se mueve también el campo debe adaptarse a la nueva posición. No obstante, no puede hacerlo instantáneamente: la teoría de la relatividad prohíbe que ninguna información se desplace a mayor velocidad que la de la luz, de tal modo que las regiones exteriores del campo no saben que la carga se ha movido hasta al menos transcurrido el tiempo que tarda la luz en desplazarse hasta ellas desde la carga. De ahí se sigue que el campo se riza o distorsiona, puesto que cuando la carga comienza a moverse las regiones lejanas del campo no cambian mientras que el campo situado en las proximidades de la carga responde rápidamente. El efecto es el envío de una pulsación de fuerza eléctrica y magnética que se desplaza hacia el exterior atravesando el campo a la velocidad de la luz. Esta radiación electromagnética transporta energía desde la carga hacia el espacio que la rodea. Si la carga oscila adelante y atrás de modo sistemático, la distorsión del campo oscila de la misma manera, y la pulsación que lo recorre adopta la forma de una onda. Las ondas electromagnéticas de este tipo las conocemos experimentalmente en forma de luz visible,

ondas de radio, radiación de calor, rayos X, etcétera, según cuál sea la longitud de onda.

De modo análogo a como se producen las ondas electromagnéticas, cabría esperar que las perturbaciones de los cuerpos masivos dieran lugar a pulsaciones en los campos gravitatorios que los rodean. En este caso, sin embargo, los rizos son pulsaciones del espacio mismo, puesto que según la teoría de Einstein la gravedad es una manifestación de la distorsión del espacio-tiempo. Las ondas gravitatorias pueden, pues, visualizarse como ondulaciones del espacio que se irradian desde la fuente de la perturbación. Cuando el físico británico del siglo pasado James Clerk Maxwell propuso por primera vez, basándose en el análisis matemático de la electricidad y el magnetismo, que las ondas electromagnéticas podían producirse mediante la aceleración de cargas eléctricas, se puso gran interés en producir y detectar ondas de radio en el laboratorio. El resultado de los estudios matemáticos de Maxwell han sido la radio, la televisión y las telecomunicaciones en general. En apariencia, las ondas gravitatorias deberían resultar igualmente importantes. Por desgracia, la gravedad es tan débil que sólo las ondas que transportan una enorme cantidad de energía tienen algún efecto detectable por nuestra actual tecnología. Es necesario que ocurran cataclismos de dimensiones astronómicas para que se detecten las ondas gravitatorias. Por ejemplo, si el Sol explotara o cayese en un agujero negro, los instrumentos actuales registrarían fácilmente las perturbaciones gravitatorias, pero incluso

acontecimientos tan violentos como la explosión de una supernova en otra parte de nuestra galaxia se mantienen más o menos en los límites de lo detectable.

Los detectores de ondas gravitatorias, como los receptores de radio, operan según un principio muy simple: los rizos espaciales, al recorrer el laboratorio, dan lugar a vibraciones en todos los objetos. Los rizos actúan ensanchando y encogiendo alternativamente el espacio en una determinada dirección, de manera que todos los objetos que encuentran en su camino se ensanchan y estrujan en una medida diminuta, con la consecuencia de que pueden inducirse oscilaciones por simpatía en barras metálicas y en cristales inverosímilmente puros del adecuado tamaño y forma. Estos objetos se sostienen con suma delicadeza y se aíslan de otras fuentes más habituales de perturbación, como son las ondas sísmicas a los vehículos a motor. Persiguiendo vibraciones diminutas, los físicos han intentado detectar el paso de la radiación gravitatoria. La tecnología utilizada es muy avanzada: consiste en barras de puro cristal de zafiro tan grandes como el brazo y detectores de oscilaciones tan sensibles que son capaces de registrar un movimiento de la barra inferior al tamaño de un núcleo atómico.

A pesar de esta impresionante instrumentación, las ondas gravitatorias todavía no han sido detectadas sobre la Tierra a satisfacción de todo el mundo. No obstante, en 1974, se descubrió un tipo peculiar de objeto astronómico que proporcionó la oportunidad única de observar ondas gravitatorias en acción. Este

objeto es el llamado púlsar binario, ya mencionado en el capítulo 2 a propósito de la velocidad de la luz. Es tal la exactitud con que los astrónomos pueden controlar las pulsaciones de radio que la menor perturbación de la órbita de los púlsares resulta detectable. Entre tales perturbaciones se cuenta un pequeño efecto debido a la emisión de ondas gravitatorias. Dado que las dos inmensas estrellas colapsadas giran la una alrededor de la otra, crean una intensa perturbación gravitatoria, con la consecuencia de que expulsan gran cantidad de radiación gravitatoria. Las ondas gravitatorias siguen siendo demasiado débiles para ser detectadas, pero su efecto sobre el sistema binario resulta medible. Dado que las ondas transportan energía fuera del sistema, la pérdida debe pagarla la energía orbital de las dos estrellas, dando lugar a que su órbita vaya lentamente frenándose, y esto es lo que han observado los astrónomos. La situación se parece bastante a la de observar el contador de la electricidad cuando la radio está enchufada: no se trata de la detección directa de las ondas de radio, sino de un efecto secundario atribuible a esas ondas.

El motivo de esta digresión sobre el tema de las ondas gravitatorias es que sus primas —las ondas electromagnéticas— fueron el punto de partida de la teoría cuántica. Como se explicó en el capítulo 1, Max Planck descubrió que la radiación electromagnética sólo puede emitirse o absorberse en paquetes discretos o cuantos, llamados fotones. Por tanto, es de esperar que las ondas gravitatorias se comporten de manera similar y que existan «gravitones» discretos

con propiedades similares a las de los fotones. Los físicos defienden los gravitones con razones de mayor peso que la simple analogía con los fotones: todos los demás campos conocidos poseen cuantos y, si la gravedad fuera una excepción, sería posible transgredir las reglas de la teoría cuántica haciendo que esos otros sistemas interaccionaran con la gravedad.

Suponiendo que los gravitones existieran, estarían sometidos a las habituales incertidumbres e indeterminaciones que caracterizan a todos los sistemas cuánticos. Por ejemplo, únicamente sería posible afirmar que el gravitón ha sido emitido o absorbido según una determinada probabilidad. Lo cual significa que la presencia de un gravitón representaría, hablando sin rigor, un pequeño rizo del espacio-tiempo, de manera que la incertidumbre sobre la presencia o ausencia de un gravitón supondría una incertidumbre sobre la forma del espacio y la duración del tiempo. De ahí se deduce que no sólo la materia está sometida a impredecibles fluctuaciones, sino que también lo está el mismo terreno de juego que es el espacio-tiempo. Así pues, el espacio-tiempo no es meramente el foro del juego aleatorio de la naturaleza, sino que es de por sí uno de los jugadores.

Puede parecer sorprendente que el espacio en que habitamos adopte los rasgos de una gelatina temblequeante, pero tampoco percibimos nada de los alborotos cuánticos en nuestra vida cotidiana. Aunque ni siquiera los sofisticados experimentos subatómicos ponen de manifiesto sacudidas aleatorias e indeterminadas del espacio-

tiempo dentro del átomo; no se han detectado ninguna clase de fuerzas gravitatorias súbitas e impredecibles.

El análisis matemático demuestra que tampoco son de esperar: la gravedad es una fuerza tan débil que sólo cuando se concentran inmensas energías gravitatorias se distorsiona el espacio-tiempo hasta el punto de que podamos constatarlo. Recuérdese que toda la masa del Sol sólo distorsiona las imágenes de las estrellas lejanas en un grado casi imperceptible. A escala subatómica, las concentraciones temporales de masa-energía pueden «tomarse prestadas» gracias al mecanismo de incertidumbre de Heisenberg, de modo que resulta sencillo calcular la duración de un préstamo de masa-energía suficiente para abollar el espacio. El principio de Heisenberg exige que cuanto mayor sea la energía más corto resulte el préstamo, con lo cual, dada la relativa debilidad de la gravedad y la correspondiente intensidad del paquete de energía necesario, de hecho sólo cabe la posibilidad de un préstamo muy breve. La respuesta resulta ser el intervalo de tiempo más corto que jamás se haya considerado físicamente significativo: conocido a veces como jiffy (periquete), un segundo contiene un uno seguido de cuarenta y tres ceros (escrito 10^{43}) de jiffies, duración tan corta que la misma luz sólo puede recorrer una milmillonésima de billonésima de billonésima de centímetro en un «jiffy», que es diez elevado a veinte veces menor que el núcleo atómico. Poco puede sorprender que no encontremos fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo en la vida cotidiana ni en los experimentos de laboratorio.

Pese al hecho de que el espacio-tiempo cuántico habita en un mundo dentro de nosotros cuya pequeñez es más lejana aún que los límites del universo con toda su inmensidad, sus efectos dan pie a las consecuencias más espectaculares. La imagen de sentido común del espacio y del tiempo viene a ser la de una especie de marco dentro del cual está pintada la actividad del mundo. Einstein demostró que el propio marco puede moverse y sufrir distorsiones: el espacio-tiempo adquirió vida. La teoría cuántica predice que si pudiéramos examinar la superficie del marco con un super microscopio observaríamos que no es liso, sino que tiene una textura granulosa producto de las distorsiones cuánticas aleatorias e imperceptibles del tejido del espacio-tiempo a escala ultramicroscópica.

Descendiendo al tamaño del jiffy aparecería una estructura aún más espectacular. Las distorsiones y las abolladuras son tan pronunciadas que se retuercen y ligan entre sí formando una red de «puentes» y «galerías». John Wheeler, el principal arquitecto de este extravagante mundo de Jiffylandia describe la situación como similar a la de un aviador que vuela a gran altura sobre el océano. A gran altitud sólo le llegan los rasgos más sobresalientes y ve la superficie del mar plana y homogénea, pero si observa desde más cerca verá ondulaciones que indican alguna clase de perturbación local: ésta es la escala de la curvatura gravitatoria del espacio-tiempo. Descendiendo más, notará las perturbaciones irregulares a pequeña escala: los rizos y las olas superpuestas a la ondulación

general: éstos son los campos gravitatorios locales. Por último, con ayuda de un telescopio percibiría que, en realidad, a muy pequeña escala, estos rizos están tan distorsionados que se deshacen en espuma. La superficie pulida y en apariencia sin quiebras es en realidad una masa hirviente de espuma y burbujas: que son las galerías y los puentes de Jiffylandia.

Según esta descripción, el espacio no es ni uniforme ni informe sino, descendiendo a esos increíbles tamaños y duraciones, un complicado laberinto de agujeros y túneles, de burbujas y telas de araña, que se crean y destruyen en una incesante actividad. Antes de que estas ideas se pusieran en circulación, muchos científicos suponían tácitamente que el espacio y el tiempo eran continuos hasta una escala arbitrariamente pequeña. La gravedad cuántica sugiere que el marco de nuestro mundo no sólo tiene una textura, sino una estructura espumosa o de esponja, lo que indica que los intervalos o duraciones no pueden dividirse infinitamente.

Una gran mistificación suele envolver el problema de qué constituye los agujeros del tejido. Después de todo, el espacio se supone vacío; luego, ¿cómo puede haber agujeros en algo que ya está vacío? Para responder a esta cuestión lo mejor es imaginar, en lugar de los agujeros de Wheeler, agujeros del espacio-tiempo lo bastante grandes para afectar a la experiencia cotidiana. Supóngase que hubiera un agujero espacial en medio de Piccadilly Circus, en el centro de Londres. Cualquier turista despistado podría desaparecer súbitamente al encontrarse con este fenómeno, probablemente para

nunca más volver. Nosotros no podríamos decir lo que ha sido de él, porque nuestras leyes de la naturaleza se limitan al universo, es decir, al espacio y al tiempo, y nada dicen de las regiones más allá de sus fronteras. De modo similar, no podemos predecir qué puede salir de un agujero del tiempo, ni siquiera qué clase de luz. Si del agujero no puede surgir absolutamente nada, aparecerá simplemente como una mancha negra.

No hay ninguna razón especial para que nuestro universo esté o no esté infestado de agujeros e incluso de auténticos bordes. Hablando metafóricamente, Dios podría aplicar unas tijeras al espacio-tiempo y despedazarlo. Si bien no tenemos pruebas de que esto haya sucedido a escala de Piccadilly, algo por el estilo puede haber ocurrido en Jiffylandia.

Un adecuado estudio de la rama de las matemáticas conocida como topología (los grandes rasgos y estructuras del espacio) revela que los agujeros espaciales no conducen necesariamente a la brusca desaparición de los objetos del espacio. Esto resulta fácil de ver comparando el espacio con una superficie bidimensional, o una hoja de papel, como hemos hecho en el caso de las metáforas del cuadro y del océano. En la Figura 10 se muestran dos posibilidades de agujero espacial. En una, el agujero está cortado en el centro de una hoja aproximadamente plana: la hoja también tiene bordes. La línea quebrada dibujada sobre la hoja representa la trayectoria de los exploradores que, al igual que los desdichados navegantes de los siglos pasados, se desvanecen en el borde del mundo (o sea en el

agujero). En el segundo ejemplo, la hoja está curvada y se cierra sobre sí misma en forma de donut, forma que los matemáticos denominan toro. El toro también tiene un agujero en el centro, pero su relación con la hoja es bastante distinta. Concretamente, no hay un borde abrupto alrededor del agujero ni en los extremos, de modo que los exploradores pueden arrastrarse por toda la superficie sin riesgo de caerse de ella: es un espacio cerrado y finito pero sin bordes y, desde el punto de vista matemático, se aproxima más a la espuma de Jiffylandia.

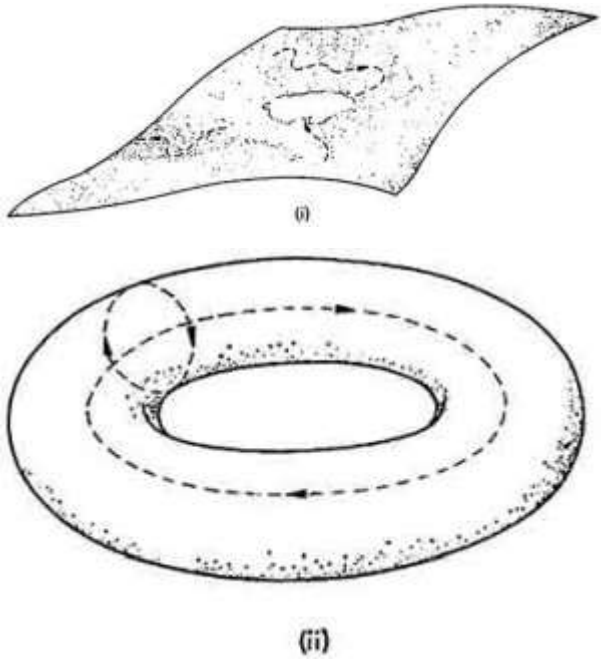

Figura 10. Agujeros en el espacio. El espacio se representa aquí mediante una superficie por la que se arrastra el observador, dejando un trayecto en forma de línea quebrada, (i) El explorador "cae" por el borde del mundo en el agujero, (ii) Puede rodear el "universo" sin dejar el espacio; esta superficie no tiene límites, aunque sea limitada

en cuanto a tamaño y haya un agujero interior. Es absolutamente posible que el universo a gran escala tenga una forma análoga al toro de la Figura 10 (ii), en cuyo caso el espacio no se extendería interminablemente, sino que se curvaría sobre sí mismo. Por supuesto, puede no tener un gran agujero en el centro —puede ser más parecido a una esfera—, pero en principio sería posible desplazarse a todo su alrededor y visitar todas las regiones. En lengua coloquial, podríamos ver todo el universo en una especie de viaje cósmico cerrado. Y al igual que los trotamundos terrícolas suelen salir de Londres hacia Moscú y regresar por Nueva York, así nuestros intrépidos cosmonautas podrían rodear el cosmos siguiendo lo que ellos considerarían un trayecto fijo y en línea recta, regresando por la dirección opuesta a aquella en que hubiesen partido.

La topología del universo podría ser mucho más complicada que la de un simple toro o la de una «esfera», y contener toda una red de túneles y puentes. Cabe Imaginar que se parezca bastante a un queso de gruyere donde el queso sería el espacio-tiempo y los agujeros aportarían la complicada topología. Además, debe recordarse que toda esta monstruosidad se expande al mismo tiempo. El espacio y el tiempo se conectarían, pues, de un modo desconcertante. Sería posible, por ejemplo, ir de un lugar a otro por una diversidad de rutas —en apariencia todas ellas trayectos en línea recta— abriéndose paso por el laberinto de puentes. La idea de que un puente espacial permitiera el paso casi instantáneo a alguna

galaxia lejana es muy del gusto de los autores de ciencia-ficción. La posibilidad de eludir la larga ruta a través del espacio intergaláctico resulta de lo más atractiva si en realidad hay gigantescos agujeros que ensartan el universo. Tomando el ejemplo de una tela, tal agujero se representaría curvando la tela en forma de U y uniendo los dos extremos en un determinado punto mediante un túnel (véase Figura 11). Por desgracia, no hay la menor prueba de la existencia real de ninguno de tales rasgos, pero tampoco se pueden descartar. En principio, nuestros telescopios deberían revelar cuál es la forma del universo, pero en la actualidad es demasiado difícil desenredar estos efectos geométricos de otras distorsiones más comunes.

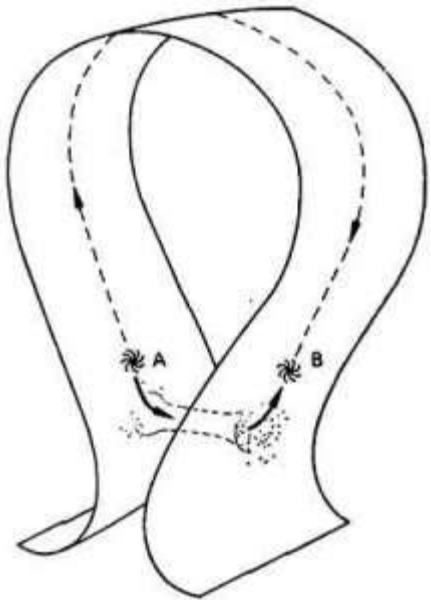

Figura 11. Túnel espacial. El viaje de la galaxia A a la galaxia B atravesando el túnel ahorra la larga ruta por el espacio intergaláctico (línea de rayas).

Cabe pensar en posibilidades aún más extravagantes. Al «conectarse» nuestra superficie (es decir, el espacio) consigo misma, podría ocurrir una torsión, como la famosa cinta de Moebius (véase Figura 12). En tal caso, no sería posible distinguir la derecha de la izquierda. De hecho, el circunnavegarte cósmico regresaría en forma de imagen reflejada de sí mismo, ¡con la mano izquierda y la derecha intercambiadas!

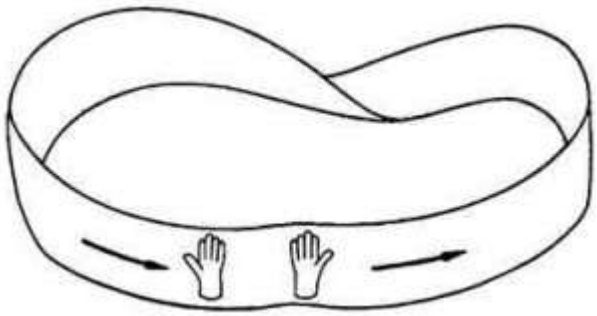

Figura 12. La cinta de Möbius tiene la extraña propiedad de que un guante de la mano derecha se transforma en guante de la mano izquierda cuando se le hace recorrer la cinta una vez. (No se puede distinguir entre el anverso y el reverso de la cinta.)

Es importante comprender que todos estos rasgos espectaculares y poco habituales del espacio podrían deducirlos sus habitantes a partir exclusivamente de observaciones hechas desde su interior. Así como no es necesario salir de la Tierra para llegar a la conclusión de que es redonda y finita, tampoco necesitamos la perspectiva de una dimensión superior desde donde ver, pongamos,

el «agujero» del centro del universo en forma de «donut» para deducir que existe. Su existencia tiene consecuencias para el espacio sin necesidad de preocuparse interminablemente de lo que hay «en» el agujero ni de lo que hay «fuera» del universo finito. De manera que considerar que el espacio está lleno de agujeros no exige especificar qué son físicamente tales agujeros: están fuera de nuestro universo físico y su naturaleza es irrelevante para la física que realmente podemos observar.

Lo mismo que puede haber agujeros en el espacio, puede haberlos en el tiempo. Un corte brusco del tiempo es de presumir que se manifestaría en forma de súbito cese del universo, pero una posibilidad más compleja consistiría en el tiempo cerrado, análogo al espacio esférico o toroidal. Una buena forma de visualizar el tiempo cerrado es representar el tiempo por una línea: cada punto de la línea corresponde a un momento del tiempo. Según la concepción habitual, la línea se prolonga en ambas direcciones ilimitadamente, pero más adelante veremos que la línea tiene un extremo o bien dos: es decir, un comienzo o final del tiempo. No obstante, la línea puede ser finita en longitud sin por eso tener extremos, por ejemplo, cerrándose en forma de círculo. Si el tiempo realmente fuera así, sería posible decir cuántas horas componen toda la duración del tiempo. Muchas veces el tiempo cerrado se describe diciendo que el universo es cíclico, repitiéndose todos los incidentes «ad infinitum», pero esta imagen presupone la discutible noción de un flujo de tiempo que nos arrastra una vez tras otra

alrededor del círculo. Como no hay modo de distinguir cada vuelta de la siguiente, en realidad no es correcto calificar tal estructura de cíclica.

En el mundo del tiempo cerrado, el pasado sería también el futuro, lo que abriría la perspectiva de una anarquía causal y de las paradojas temporales de que tanto se han ocupado los autores de ciencia-ficción. Lo que es peor, si el tiempo se uniera a sí mismo, de manera similar a la cinta retorcida que se representa en la Figura 12, no sería posible distinguir de ninguna manera el avance del retroceso temporal, por lo mismo que no se puede distinguir entre la derecha y la izquierda en un espacio de tipo Moebius. No está claro sin embargo que fuéramos capaces de apreciar unas características del tiempo tan extravagantes. Quizá nuestro cerebro, con objeto de ordenar nuestras experiencias de modo significativo, fuera incapaz de percibir esta gimnasia temporal.

Aunque los bordes y los agujeros del espacio y del tiempo puedan parecer una enloquecida pesadilla matemática, son tomados muy en serio por los físicos, quienes consideran que muy bien pueden existir tales estructuras. No hay prueba alguna del «despedazamiento» del espacio-tiempo, pero hay fuertes indicios de que el espacio y el tiempo pueden ir desplegando bordes o límites, de tal modo que más que saltar insospechadamente por el extremo de la creación, iríamos siendo conscientes, dolorosamente y, en resumidas cuentas, suicidamente, de nuestra próxima partida («agujeros con dientes»). Volviendo a observar la Figura 10 (i), es

evidente que el agujero, que es un simple corte en el espacio, se abre abruptamente. No hay rasgos que adviertan la proximidad del borde y anuncien la inminente discontinuidad. Igual ocurre con los agujeros similares del tiempo: nada anunciaría el fallecimiento del universo o de una porción del universo. En consecuencia, nuestra física no puede predecir (ni rebatir) la existencia de tales agujeros. No obstante, es posible predecir los agujeros y los bordes que se despliegan gradualmente en el espacio-tiempo «ordinario» y de hecho los predicen firmes principios físicos que muchos científicos aceptan.

La Figura 13 es un intento de dibujar sobre una superficie bidimensional el aspecto que podría tener un borde del espacio, el anunciado agujero con dientes. La superficie es una estructura similar a un cono que se afila lenta pero incesantemente hacia un punto denominado cúspide: hablando sin rigor, la punta es infinitamente aguda, de manera que nada puede «doblar» la punta y descender por el otro lado. El objeto que se acerque a la punta comenzará a sentirse incómodo presionado por la creciente curvatura y constreñido a un espacio cada vez menor. Cuando esté cerca de la punta, el objeto será progresivamente estrujado y no podrá alcanzar la punta propiamente dicha —quedándose comprimido hasta reducirse a nada— puesto que la punta no tiene tamaño. El precio de visitar la punta es la destrucción de toda extensión y toda estructura; el objeto nunca volverá.

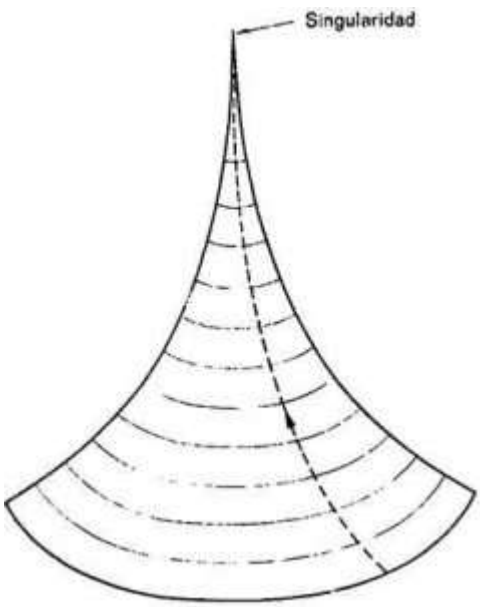

Figura 13. Agujero con dientes. El espacio (la superficie) se curva cada vez más hasta que se concentra por completo en un punto y cesa. Un observador curioso (línea de rayas) que explora las vecindades de la punta corre el riesgo de desaparecer para siempre en el extremo final, para nunca volver. No obstante, es advertido del amenazador final conforme va siendo estrujado violentamente al disminuir el espacio en las proximidades de la punta.

Estos extremos en forma de cúspide del espacio-tiempo de los que ningún viajero puede retornar fueron predichos por la teoría de la relatividad de Einstein y se conocen con el nombre de singularidades. La creciente curvatura de sus inmediaciones corresponde físicamente a fuerzas gravitatorias que descuartizarían a cualquier cuerpo y lo aplastarían progresivamente hasta un volumen nulo. Una de las circunstancias en que podría presentarse tal rasgo es como consecuencia del colapso gravitatorio de una

estrella apagada. Cuando se agota el combustible de una estrella, ésta pierde calor y no puede mantener la suficiente presión interior para soportar su propio peso, y por lo tanto se encoge. En las estrellas suficientemente grandes, la contracción se produce con tal rapidez que equivale a una súbita explosión hacia dentro y la estrella se encoge, quizás ilimitadamente. Se forma una singularidad espaciotemporal y por ahí puede desaparecer buena parte de la estrella e incluso toda. Aun cuando no ocurra eso, los curiosos observadores que sigan su desenvolvimiento es posible que sean arrastrados hacia la singularidad. Existe la extendida creencia de que si se produce una singularidad, se localizará dentro de un agujero negro donde no será posible verla sin caer en su interior y salir del universo.

Otro tipo de singularidad podría haber existido en el nacimiento del universo. Muchos astrónomos creen que el Big Bang representa los residuos en erupción de una singularidad que constituyó literalmente la creación del universo.

La singularidad del Big Bang podría equivaler al extremo temporal pasado del cosmos: un comienzo del tiempo, así como del espacio, además del origen de toda la materia. De manera similar, puede haber un extremo del tiempo en el futuro, en el que todo el universo desaparezca para siempre —y con él el espacio y el tiempo— luego de las consabidas compresiones y subsiguiente aniquilación. Otras imágenes del final del universo pueden verse en mi libro The Runaway Universe (El universo desbocado, Salvat, 1988)).

Una vez descritos algunos de los rasgos más extraordinarios que la física moderna atribuye al espacio y al tiempo, merece la pena que volvamos a Jiffylandia y a las nociones de la teoría cuántica con objeto de entender qué es lo que en realidad significa la subestructura espumosa. En los capítulos 1 y 3 hemos explicado que los electrones y demás partículas subatómicas no se mueven sencillamente de A a B.

Por el contrario, su movimiento está controlado por una onda que puede extenderse, en ocasiones, por territorios muy alejados del camino recto. La onda no es una sustancia, sino una onda probabilística donde la perturbación de la onda es pequeña (por ejemplo, lejos de la línea recta) las probabilidades de encontrar la partícula son escasas.

La mayor parte del movimiento de la onda se concentra siguiendo el camino clásico de Newton, que por tanto constituye la trayectoria más probable. Este efecto de agrupamiento resulta pronunciadísimo en los objetos macroscópicos, como en las bolas de billar, cuya dispersión en forma de ondas nunca percibimos.

Si disparamos un haz de electrones (o incluso un único electrón), podemos escribir la formulación matemática de la onda, que avanza según la famosa ecuación de Schrödinger. La onda muestra la importante propiedad, característica de las ondas, de interferirse en el caso de que, por ejemplo, el haz choque con dos ranuras de una pantalla: pasará por ambas y la perturbación bifurcada se recombinará en forma de crestas y vientres. La onda no describe un

mundo sino una infinitud de mundos, cada uno de los cuales contiene una trayectoria distinta. Estos mundos no son todos independientes; el fenómeno de la interferencia demuestra que se superponen y «entrometen en sus caminos». Sólo una medición directa puede mostrar cuál de estos infinitos mundos potenciales es el real. Lo cual plantea delicadas y profundas cuestiones sobre el significado de lo «real» y sobre qué constituye una medición, cuestiones de las que nos ocuparemos ampliamente en los siguientes capítulos, pero de momento nos limitaremos a señalar que cuando un físico desea describir el movimiento de los electrones, o en general cómo cambia el mundo, se enfrenta a la onda y estudia su movimiento. La onda contiene codificada toda la información disponible sobre el comportamiento de los electrones.

Si imaginamos ahora todos los mundos posibles —cada uno de ellos con una trayectoria distinta del electrón— como una especie de gigantesco super mundo pluridimensional en el que las alternativas se sitúan paralelamente en igualdad de condiciones, entonces podemos considerar que el mundo que resulta «real» para la observación es una proyección tridimensional o una sección de este super mundo. En qué medida puede considerarse que el super mundo existe en realidad lo expondremos a su debido tiempo.

Básicamente, necesitamos un mundo distinto para cada trayectoria del electrón, lo que habitualmente significa que necesitamos una infinidad de mundos, y similares infinidades de mundos para cada átomo o partícula subatómica, cada fotón y cada gravitón que

exista. Es evidente que este super mundo es un mundo muy grande, en realidad con las infinitas dimensiones del infinito.

La idea de que el mundo que observamos pudiera ser una tajada tridimensional o proyección de un super mundo de infinitas dimensiones tal vez no sea fácil de entender.

Un humilde ejemplo de proyección puede servir de ayuda. Imagínese una pantalla iluminada que se utiliza para proyectar la silueta de un objeto simple, como una patata. La imagen de la pantalla presenta una proyección bidimensional de lo que en realidad es una forma tridimensional, es decir, de la patata. Cambiando la orientación de la patata se puede obtener una infinita variedad de siluetas, cada una de las cuales representa una proyección distinta del espacio mayor. Igualmente, el mundo que nosotros observamos está conformado como una proyección del super mundo; cuál proyección es un problema de matemáticas y estadística. A primera vista podría parecer que reducir el mundo a una serie de proyecciones aleatorias fuera una receta en pro del caos, donde cada momento sucesivo presentaría a nuestros sentidos un panorama completamente nuevo, pero los dados están muy cargados a favor de los cambios bien ordenados y acordes con las leyes de Newton, de modo que las fluctuaciones espasmódicas, que existen sin ningún género de dudas, quedan enterradas a buen recaudo entre los escondrijos microscópicos de la materia, manifestándose tan sólo a escala subatómica.

Al igual que la partícula newtoniana se mueve de tal modo que

minimiza su acción y la onda cuántica se arracima alrededor de una trayectoria de mínima acción, cuando se trata de la gravedad encontramos que el espacio también minimiza su acción. La espuma cuántica de Jiffylandia perturba algo el movimiento mínimo, pero sólo en la escala absurdamente pequeña de que hemos hablado en la primera parte de este capítulo. Por tanto, el mismo espacio puede describirse como una onda y esta onda espacial también poseerá las propiedades de interferencia. Además, del mismo modo que podemos construir mundos distintos para la trayectoria de cada electrón, también es posible construir mundos distintos para cada forma del espacio. Combinados todos juntos nos encontramos con un «superespacio» de infinitas dimensiones. El superespacio contiene todos los espacios posibles —donuts, esferas, espacios con túneles y puentes—, cada uno de ellos con una estructura diferente, con una espuma distinta; una infinidad de formas geométricas y topológicas.

Cada uno de los espacios del superespacio contiene su propio super mundo de todas las posibles organizaciones de las partículas. El mundo de nuestros sentidos, al parecer, es un elemento tridimensional único proyectado desde este superespacio infinito.

Nos hemos alejado tanto de la noción de sentido común del espacio y del tiempo que merece la pena detenernos a hacer inventario. La ruta hacia el superespacio es difícil de seguir, pues exige a cada paso renunciar a alguna idea muy querida o bien a aceptar algún concepto desconocido. La mayor parte de la gente considera el

espacio y el tiempo como características tan básicas de la existencia que no pone en duda sus propiedades. De hecho, el espacio suele imaginarse como completamente carente de propiedades: un vacío desocupado y sin forma. La idea más difícil de aceptar es que el espacio tenga forma. Los cuerpos materiales tienen forma «en» el espacio, pero el espacio en sí parece ser más bien un contenedor que un cuerpo.

A todo lo largo de la historia ha habido dos escuelas filosóficas que se han ocupado de la naturaleza del espacio. Una escuela, de la que formó parte el propio Newton, enseña que el espacio es una sustancia que no sólo tiene geometría, sino que también puede presentar características mecánicas. Newton creía que la fuerza de la inercia estaba causada por la reacción del espacio frente a un cuerpo acelerado. Por ejemplo, cuando un niño da vueltas en un tiovivo siente la fuerza centrífuga; el origen de esta fuerza lo adscribe Newton al espacio envolvente. Ideas similares se han propuesto de vez en cuando, en las que la analogía con el fluir del río implica una más estrecha asociación con la materia.

En contraposición a estas imágenes, otra escuela niega que el espacio y el tiempo sean cosas, sino meras relaciones entre los cuerpos materiales y los acontecimientos. Filósofos como Leibniz y Ernst Mach negaron que el espacio actuara sobre la materia y sostuvieron que todas las fuerzas se debían a otros cuerpos materiales.

Mach opinaba que la fuerza centrífuga que opera sobre el niño

montado en el tiovivo se debe al movimiento relativo entre el niño y la materia lejana del universo. El niño siente una fuerza porque las remotísimas galaxias presionan contra él, resistiéndose al movimiento.

Según estas ideas, el tratamiento del espacio y el tiempo es una mera conveniencia lingüística que nos permite describir las relaciones entre los objetos materiales. Por ejemplo, decir que hay algo más de 300.000 km. de espacio entre la Tierra y la Luna es simplemente una forma útil de decir que la distancia de la Tierra a la Luna es de algo más de 300.000 km.

Si la Luna no estuviera allí, ni tuviéramos otros objetos o rayos luminosos que manipular, resultaría imposible saber hasta dónde se extiende un determinado trecho de espacio. La medición de distancias o de ángulos en el espacio requiere varas de medir, teodolitos, señales de radar o algún otro instrumento material. Por eso se considera que el espacio no es más material que la nacionalidad. Ambas cosas son descripciones de relaciones que existen entre las cosas, entre las cosas materiales y entre los ciudadanos, respectivamente. Ideas similares se han aplicado a la noción de tiempo. ¿Es necesario considerar el tiempo como una cosa o como una conveniencia lingüística para expresar las relaciones entre los acontecimientos?

Por ejemplo, decir que uno espera desde hace rato el autobús sólo significa, en realidad, que el intervalo entre la llegada a la parada del autobús y la comparecencia del autobús se ha prolongado más

de lo habitual. La duración del tiempo es una forma coloquial de describir la relación temporal entre estos dos acontecimientos.

Cuando nos acercamos a la idea del espacio-tiempo curvo, indudablemente resulta más útil adoptar la primera perspectiva, en la que el espacio y el tiempo se tratan como sustancias. Esto puede no ser estrictamente necesario desde un punto de vista lógico, pero sirve para ayudar a la intuición. Visualizar el espacio como un bloque de caucho aporta una vivida imagen de lo que se entiende por un espacio que se dobla y estira. El rasgo fundamental de la teoría de la relatividad general de Einstein es que el espacio-tiempo, que tiene esta curiosa cualidad, se mueve, es decir, cambia de forma, siendo la causa de este movimiento la presencia de materia y energía. Una vez aprehendida la noción de un espacio-tiempo dinámico, los aspectos cuánticos resultan más significativos.

Cuando los conceptos de la teoría cuántica se aplican al espacio-tiempo, aumenta la extrañeza porque se complica la estructura, ya de por sí desconcertante, de un espacio-tiempo dinámico con los fantásticos rasgos de la teoría cuántica. La mecánica cuántica implica que no basta con considerar un espacio-tiempo, sino una infinidad de ellos, con distintas formas y topologías. Todos estos espacio-tiempos encajan entre sí según el modelo ondulatorio, interfiriéndose mutuamente. La fuerza de la onda es la medida de la probabilidad de que un espacio con esa forma concreta aparezca como la representación del universo real cuando se hace una observación. Los espacios evolucionan, como ocurre al expandirse el

universo, y el sobrecogedor número de estos mundos alternativos aumentará de modo similar.

No obstante, hay algunos que fluctúan muy lejos de la trayectoria principal, al igual que los niños en el parque de que hemos hablado. La fuerza de la onda de estos mundos descarriados es muy pequeña, de modo que sólo hay una infinitésima probabilidad de que realmente se puedan observar. Pero a la escala de Jiffylandia, estas fluctuaciones se hacen mucho más pronunciadas y ocurren con frecuencia desviaciones del espacio pulido y terso.

Al afrontar la existencia de un superespacio donde miríadas de mundos se mantienen cosidos entre sí mediante una curiosa superposición de carácter ondulatorio, el mundo concreto de la vida cotidiana parece situarse a años luz. Con conceptos tan abstractos y sorprendentes como éstos, uno se ve obligado a preguntarse hasta qué punto el superespacio es “real”.

¿Existen en realidad estos mundos alternativos o son meros términos de algunas fórmulas matemáticas que supuestamente representan la realidad? ¿Cuál es el significado de las misteriosas ondas que rigen el movimiento de la materia a la vez que del espacio-tiempo y que determinan las probabilidades de que exista un determinado mundo concreto? En cualquier caso, ¿qué es la «existencia» en medio de semejante cenagal de conceptos sin sustancia? ¿Dónde encajamos nosotros —los observadores— dentro de este esquema? Estas son algunas de las preguntas sobre las que volveremos. Veremos que el juego cósmico del azar es mucho más

sutil y extravagante que la simple ruleta.

Capítulo VI
La naturaleza de la realidad

Hasta el momento hemos sido bastante imprecisos con nociones como «el mundo real» y la «existencia» de ondas de materia o superespacio. En este capítulo nos enfrentaremos cara a cara con las preguntas fundamentales que plantea la revolución cuántica y examinaremos en qué medida estos conceptos poco habituales se suponen aplicables a algo verdaderamente objetivo o bien si tan sólo son complicadas maquinaciones de los físicos para calcular matemáticamente los resultados de medir entidades más concretas y conocidas.

Debe subrayarse desde un principio que de ninguna manera hay acuerdo unánime entre los físicos, y menos entre los filósofos, sobre la naturaleza ni sobre la existencia de la realidad, ni siquiera sobre su misma significación ni sobre en qué medida las características cuánticas la socavan. Sin embargo, desde hace alrededor de cincuenta años, están en el aire determinados problemas y paradojas y, aunque no se han resuelto a satisfacción de todo el mundo, resaltan las cualidades profundamente extrañas que la teoría cuántica ha aportado a nuestro mundo.

La mayor parte de la gente tiene una imagen intuitiva de la realidad según los siguientes principios. El mundo está lleno de cosas (estrellas, nubes, árboles, rocas…) entre las cuales hay observadores conscientes (personas, delfines, marcianos (?)…)

independientemente de si han sido descubiertos o de si podemos experimentar con ellos o medirlos en un futuro. En resumen: hay un mundo «exterior». En la vida cotidiana no ponemos en cuestión tal creencia. El monte Everest y la nebulosa de Andrómeda existían con toda seguridad antes de que existiera nadie para comentar tal hecho; los electrones zumbaban por el universo originario al margen de si, en último término, aparecería el hombre en el cosmos, etcétera.

Puesto que los científicos han revelado y creen en las leyes de la naturaleza, se acepta que el universo «late» por sí solo, sin ayuda y ajeno a nuestra participación en él. Lo evidente de todo lo dicho hace aún más sorprendente descubrir que carece de fundamento.

Es evidente que el mundo que una persona realmente experimenta no puede ser del todo objetivo, puesto que experimentamos el mundo en una acción recíproca. El acto de la experiencia requiere dos componentes: el observador y lo observado. La mutua interacción entre ambos nos proporciona la sensación de la «realidad» que nos envuelve.

Asimismo es obvio que nuestra versión de esta «realidad» estará coloreada por nuestro modelo del mundo según lo ha erigido la experiencia anterior, la predisposición emocional, las expectativas, etcétera. Evidentemente, pues, en la vida cotidiana no experimentamos en absoluto una realidad objetiva, sino una especie de cóctel de perspectivas internas y externas.

El objetivo de las ciencias físicas ha sido desprenderse de esta visión

personalizada y semi subjetiva del mundo y construir un modelo de la realidad que sea «independiente» del observador. Los procedimientos tradicionales para alcanzar esta meta son los experimentos repetibles, la medición mediante máquinas, la formulación matemática, etc. ¿Hasta qué punto es logrado el modelo que ha proporcionado la ciencia? ¿Puede verdaderamente describir un mundo que existe con independencia de las personas que lo perciben?

Antes de ocuparnos de la teoría cuántica, es interesante volver a las ideas de la mecánica de Newton, con sus imágenes de un universo mecánico habitado por observadores que son meros autómatas, para ver hasta dónde se puede llegar en la construcción de un modelo de este mundo. En el capítulo 3 hemos visto que es imposible hacer ninguna observación sin perturbar el sistema que se observa. Para adquirir información sobre algo es necesario que alguna clase de influencia se desplace desde el sistema que interesa al cerebro del observador, quizás a través de una compleja cadena de aparatos. Esta influencia siempre tiene una reacción refleja sobre el sistema de acuerdo con el principio de acción y reacción de Newton, con lo que perturba ligeramente su estado. Ya hemos citado un ejemplo sobre el movimiento de los planetas en el sistema solar, cuyas órbitas son infinitésima pero inevitablemente perturbadas por la luz con que los vemos. Podría pensarse que las perturbaciones debidas al observador suponen un golpe mortal para la idea de que el universo es una máquina, pero no es así. El cuerpo

del observador —cerebro, órganos de los sentidos, sistema nervioso, etc.— puede considerarse formando íntegramente parte de la gran maquinaria cósmica, entendiendo el sistema total (observador más observado) como una gran máquina que determina la inevitabilidad del resultado de todas las mediciones.

En esta imagen newtoniana del universo, los observadores desempeñan papeles predeterminados en la comedia sin iniciativa alguna.

Tampoco es necesario, según esta teoría, que todos los sistemas y todos los procesos sean realmente observados para que existan: ¿quién negaría que los eclipses ocurren aunque no haya nadie que los vea?

Las leyes de la mecánica de Newton permiten calcular la actividad de cuerpos invisibles, desde los átomos hasta las galaxias, y comprobar las predicciones mediante meras observaciones esporádicas.

El hecho de que los sistemas parezcan funcionar según estas predicciones matemáticas refuerza la creencia de que eso es realmente «exterior», que opera por sí mismo, sin necesitar que nuestra constante inspección lo haga latir.

Un rasgo central de esta visión newtoniana del mundo real es la existencia de «cosas» identificables a las que, coherentemente, se pueden adscribir atributos intrínsecos. En la vida cotidiana no tenemos dificultad en aceptar, por ejemplo, que un balón de fútbol es un balón de fútbol, una cosa concreta con propiedades fijas

(redondo, de cuero, hueco...). No es una casa ni una nube ni una estrella. El mundo se percibe como una colección de objetos distintos en mutua interacción. No obstante, esta idea no es más que aproximada.

Los objetos son distintos en la medida en que su mutua interacción es, en un sentido vago, pequeña.

Cuando una gota de líquido cae en el océano interacciona fuertemente con la gran masa de agua y queda absorbida por ésta, perdiendo por completo su identidad. Tomando otro ejemplo, el feto sólo gradualmente adquiere una identidad distinta de la madre conforme crece en el vientre. Hablando en términos generales, cuando los objetos están a gran distancia los concebimos distintos: los planetas del sistema solar, los átomos de Londres y Nueva York, etc. Esto se debe a que todas las fuerzas interactivas conocidas disminuyen rápidamente con la distancia, de tal modo que las entidades bien separadas se comportan casi con independencia.

Desde luego, nunca son completamente independientes —siempre hay un ensamblaje residual entre todas las cosas—, pero la noción de objetos distintos y separados es muy útil en la práctica.

Hay una dificultad filosófica para atribuir identidad a las cosas, como la de que el balón de fútbol es el mismo balón en todos los momentos. Cuando se le da una patada pierde parte del cuero, gana barro y betún de la bota, expele algo de aire, adquiere fuerza y rotación, etcétera. ¿Por qué pensamos en el balón chutado como «el» balón? Del mismo modo, es una práctica habitual atribuir

identidades fijas a las personas, aunque todos los días parte de sus células corporales son sustituidas, y su personalidad, emociones y recuerdos son alterados por las nuevas experiencias de las últimas veinticuatro horas. No se trata exactamente de la misma persona que conocimos ayer. En un plano aún más básico, el balón de fútbol observado no puede ser precisamente el mismo que el no observado como consecuencia de las perturbaciones provocadas por el mismo acto de la observación.

La solución a estas dificultades parece ser que el universo, en cuanto conjunto, es en realidad indivisible, pero podemos dividirlo de forma muy aproximada en muchas pequeñas cosas cuasi autónomas cuya diferenciada identidad, si bien susceptible de polémicas filosóficas, rara vez se pone en duda en la vida ordinaria. Tanto si se considera el cosmos una máquina única como si se considera una colección de máquinas laxamente acopladas, su realidad parece estar sólidamente fundada por lo que respecta a la física de Newton.

Aunque estamos incrustados en esta realidad, la concebimos independiente de nosotros y existente antes y después de nuestra existencia personal.

Debe mencionarse que esta concepción de la realidad ha sido criticada por la escuela filosófica denominada positivismo lógico, que cree, por así decirlo, que las proposiciones sobre el mundo que no pueden ser verificadas por los seres humanos carecen de sentido.

Por ejemplo, afirmar que los eclipses ocurrían antes de que hubiera nadie que pudiese verlos se considera una proposición sin sentido. ¿Cómo podrá verificarse alguna vez su realidad? Para el positivismo extremo, la realidad se limita a lo que realmente se percibe: no hay un mundo exterior que exista con independencia del observador. Aunque se conceda que es imposible establecer la realidad de los acontecimientos no observados por ningún medio operativo, tampoco, en ese mismo sentido, puede demostrarse su irrealidad. Ambas nociones deben considerarse carentes de sentido. La concepción positivista del mundo, al menos en su forma extrema, no concuerda con la concepción de sentido común, y pocos científicos se adhirieron a sus principios fundamentales. Además, ha de hacer frente a sus propias objeciones filosóficas (por ejemplo, ¿cómo es posible verificar la afirmación de que las proposiciones inverificables carecen de sentido?). En lo que sigue supondremos que tiene sentido cierta noción del mundo exterior, independiente de nosotros, y que las cosas existen aun cuando quizás ocurra que nosotros nada sepamos de ellas. Retomando ahora la teoría cuántica, ya podemos vislumbrar algunos de los problemas que surgen en relación con la naturaleza de la realidad. Si bien un balón de fútbol observado se diferencia infinitésimamente de un balón de fútbol no observado, cuando llegamos a las partículas subatómicas el acto de la observación tiene efectos drásticos. Como hemos señalado en el capítulo 3, cualquier medición llevada a cabo sobre un electrón, por ejemplo, es probable que tenga como resultado un

retroceso grande e incontrolado de éste. No obstante, el que se produzca una inevitable perturbación como ésta no socava la idea de realidad; pero no hay modo de saber, ni siquiera en teoría, los detalles de tal perturbación. No es posible, por ejemplo, atribuir simultáneamente las propiedades de una exacta localización y un exacto movimiento a los electrones. Existe también una profunda dificultad en relación con la viabilidad de atribuir existencia independiente a los miembros individuales de una masa de partículas subatómicas.

Puesto que todos los electrones son intrínsecamente idénticos, cuando se acercan mucho no es posible decir cuál es cuál, pues su localización puede ser más insegura que las distancias mutuas. Tampoco, como expusimos en el capítulo 3, es siempre posible decir por qué ranura de una pantalla pasa «en realidad» un fotón o un electrón.

A pesar de esto, podría suponerse que es posible imaginar un microcosmos donde los electrones y las demás partículas «realmente» ocupen posiciones ciertas y se muevan según trayectos bien definidos, aun cuando nosotros seamos incapaces de asegurar cuáles son en la práctica.

A primera vista, parece que la tan importante incertidumbre la introduce de hecho el acto de la medición, como si de alguna manera el aparato utilizado para sondear el microsistema inevitablemente lo hiciera vibrar un poco. En cualquier caso, es evidente que el efecto vibratorio debe seguir operando incluso sin

nuestra interferencia directa, pues de lo contrario los átomos que no estuvieran bajo observación directa no obedecerían las leyes cuánticas y deberían desmoronarse sobre sí mismos.

Todavía es posible conjurar un cuadro en el que todas las partículas subatómicas realmente ocupen una posición determinada y tengan una velocidad concreta, aun cuando estén en plena actividad. Después de todo, sabemos que las moléculas de un gas, por ejemplo, se agitan en rápido movimiento, actividad ésta que es la causa de la presión del gas. Es imposible para nosotros seguir las complicadas maniobras de miles de millones de pequeñas moléculas, de modo que, para fines prácticos, existe una profunda incertidumbre sobre cómo se comportarán las moléculas individuales de gas. Esta indeterminación de los movimientos de las moléculas se debe meramente a nuestra ignorancia sobre sus condiciones exactas y es similar a la incertidumbre del cara-y-cruz de que nos hemos ocupado en el capítulo 1. En tales circunstancias, a los científicos no les queda más remedio que utilizar métodos estadísticos, pues aunque el decurso de cada molécula individual pueda ser muy inseguro, las propiedades medias de una gran masa sí son posibles de estudiar, lo mismo que los hábitos deambulatorios de los visitantes del parque presentan un orden colectivo a pesar de la incertidumbre individual (véase Figura 3). De este modo es posible calcular con exactitud las probabilidades de las caras y de las cruces, o bien la probabilidad de que dos gases distintos se entremezclen en un minuto, etc. Tal descripción de los

sistemas compuestos de elementos caóticos y aleatorios, hecha en términos de probabilidades, parece aproximarse mucho a la descripción cuántica de las partículas subatómicas individuales que se desplazan de manera probabilística. Por tanto, es natural preguntarse si el comportamiento impredecible de, pongamos, un electrón tiene su origen en fenómenos similares a los que hacen inseguro el comportamiento global de la moneda lanzada al aire y de la caja de gases. ¿No sería posible que el electrón y sus colegas subatómicos no fueran el nivel ínfimo de toda la estructura física, sino que estuvieran sometidos a influencias ultramicroscópicas que los hacen tambalearse? Si tal fuera el caso, la incertidumbre cuántica podría atribuirse exclusivamente a nuestra ignorancia de los detalles exactos de este substrato de fuerzas caóticas.

Cierto número de físicos han intentado construir una teoría de los fenómenos cuánticos basada en esta idea, en la que las fluctuaciones en apariencia caprichosas y aleatorias de los microsistemas no representan una indeterminación intrínseca de la naturaleza, sino que son simples manifestaciones de un nivel oculto de la estructura donde fuerzas complicadas, pero absolutamente determinadas, hacen bambolearse a los electrones y demás partículas. La indeterminación de los sistemas cuánticos, pues, tendría el mismo origen que la indeterminación del tiempo atmosférico, que sólo puede predecirse sobre bases probabilísticas (es decir, hay un cincuenta por ciento de probabilidades de que llueva mañana) y plantearse en términos generales con la ayuda de

la estadística.

Hay dos razones por las que esta explicación de la indeterminación cuántica no ha recibido el aplauso general. La primera es que necesariamente introduce una gran complicación en la teoría porque, aparte de los electrones y demás materia subatómica, necesitaríamos entender los detalles de esas misteriosas fuerzas que hacen tambalearse a las partículas. ¿Cuál es su origen, cómo actúan, qué leyes, a su vez, obedecen? La segunda razón es mucho más fundamental y toca el auténtico meollo de la revolución cuántica y de toda tentativa de otorgar realidad objetiva al mundo de la materia subatómica. Buena parte de este capítulo se dedicará a analizar las portentosas conclusiones que parecen ser insoslayables, cuando se examina la naturaleza de la realidad a la luz de determinados experimentos subatómicos. El más famoso de estos experimentos fue ideado en principio por Albert Einstein en colaboración con Nathan Rosen y Boris Podolsky, ya en 1935, pero sólo en los últimos años ha avanzado la tecnología de laboratorio hasta el punto de poder comprobar sus ideas.

Los experimentos han confirmado que, al menos en forma simple, la posibilidad de que la incertidumbre cuántica nazca exclusivamente de un substrato de oscilaciones no es viable.

El principio que subyace a la «paradoja» de Einstein-Rosen-Podolsky, como se ha venido a denominar, puede comprenderse imaginando que se ha disparado un proyectil, pongamos por una pistola.

La experiencia demuestra que la pistola retrocede, de tal modo que la fuerza hacia adelante de la bala queda exactamente equilibrada por una fuerza igual y en dirección contraria de la pistola. Si la pistola y la bala tuviesen la misma masa, ambas saldrían lanzadas en direcciones contrarias a la misma velocidad. Ahora bien, si el proyectil se lanza de tal modo que adquiera una rotación, el mismo principio exige que la pistola rote en sentido contrario. Tanto el movimiento hacia adelante como el rotatorio de la bala reaccionan con la pistola en el momento del lanzamiento impartiéndole un empuje en sentido contrario.

Hay partículas subatómicas que emiten proyectiles rotatorios y sufren retrocesos, y los experimentos demuestran que las reglas conocidas de la mecánica también se aplican a estos movimientos. Las partículas incluso pueden desintegrarse en una doble progenie idéntica, que sale lanzada en direcciones opuestas y rotando en sentidos contrarios. Por ejemplo, el mesón pi, que es eléctricamente neutro y no tiene «spin», explota en una diezmillonésima de billonésima de segundo en dos fotones que se desplazan en direcciones opuestas, uno de los cuales rota en el sentido de las agujas del reloj a lo largo de su trayectoria, mientras el otro lo hace al revés.

Las reglas de la teoría cuántica exigen que sea igual de probable que el fotón rote en cualquier sentido, puesto que por simetría, no hay ninguna razón para que ningún sentido rotatorio tenga preferencia sobre el otro. Así pues, si se mueven en dirección norte-sur, el que

se dirige hacia el norte tiene las mismas probabilidades de rotar en el sentido de las agujas del reloj como en sentido contrario. No obstante, si el fotón orientado hacia el norte rota en el sentido de las agujas del reloj, el orientado hacia el sur debe hacerlo, para cumplir las leyes de la mecánica mencionadas, en sentido contrario a las agujas del reloj, y viceversa (véase Figura 14). Debido a esta insoslayable correlación entre las direcciones de los dos fotones, la medición del sentido en que gira uno de ellos aporta inmediatamente la información sobre el sentido en que lo hace el otro.

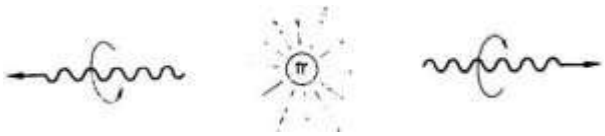

Figura 14. Correlación del spin. Cuando el mesón pi neutro se descompone en dos fotones, la rotación de uno de estos debe ser opuesta a la del otro, de manera que si se mide la rotación (spin) del de la derecha, pongamos, se puede deducir inmediatamente la del de la izquierda. Sin embargo, la paradoja surge cuando se comprueba que la dirección del spin está intrínsecamente indeterminada hasta que realmente se realiza la medición.

Lo esencial de este ejemplo es que, tras la desintegración del cuerpo progenitor, las dos partículas resultantes pueden alejarse a gran distancia. En realidad, si la explosión ocurriera en el espacio exterior, las partículas podrían seguir alejándose hasta distanciarse

millones de años luz. Si medimos el «spin», la observación local del sentido en que gira una de las partículas aporta de inmediato la información correspondiente sobre la otra partícula, que puede estar muy lejos. Ahora bien, de acuerdo con la teoría de la relatividad, la información no puede trasladarse a mayor velocidad que la luz, de tal modo que la adquisición instantánea de un conocimiento sobre la partícula situada en un lugar muy lejano podría quebrantar este principio fundamental. En el caso de la bala y la pistola, el sentido común nos dice que, mucho antes de que se observe el sentido de la rotación, la bala ya está «realmente» rotando, pongamos, en el sentido de las agujas del reloj y la pistola en sentido contrario, y el único efecto de la medición consiste en hacer ese conocimiento accesible al observador. Lo cual no equivale verdaderamente a enviar una señal a mayor velocidad que la luz, puesto que ninguna influencia física se desplaza entre los dos cuerpos. De modo que, contando con la existencia de un mundo real, independiente de nuestro conocimiento y de nuestra intención de hacer una observación, que contiene objetos reales (pistolas, balas) con atributos fijos y significativos (rotación, alejamiento), no hay conflicto entre los principios de la relatividad y la incapacidad para enviar señales a una velocidad mayor que la de la luz.

Resulta asimismo natural extender esta imagen al terreno subatómico y suponer que las dos partículas están «realmente» rotando en tal y cual sentido, con independencia de si nosotros tratamos de descubrirlo mediante un experimento. Ahora se

demostrará que la naturaleza ondulatoria de las partículas subatómicas derriba toda tentativa directa de defender que tales entidades se están «realmente» comportando de una determinada manera antes de que las observemos.

Escojamos como las dos partículas que se alejan dos fotones de luz. En lugar de ocuparnos de su «spin», como antes, es más fácil estudiar una propiedad emparentada llamada polarización, pues es conocida en la vida cotidiana y se trata asimismo de una cualidad que los físicos han medido realmente y que permite verificar experimentalmente lo que a continuación describiremos. Las gafas de sol modernas suelen llevar cristales polarizados y comprender su funcionamiento es, en esencia, todo cuanto se precisa para entender por qué el mundo no es tan real como podría parecer. La luz es una vibración electromagnética y cabe preguntarse en qué dirección vibra el campo electromagnético. Un estudio matemático, o bien algunos sencillos experimentos, demuestran que si la onda se desplaza, pongamos, verticalmente, entonces las vibraciones siempre son horizontales; el movimiento de la onda es transversal a la dirección de desplazamiento. Por razones de simetría, un rayo de luz vertical elegido al azar no mostrará ninguna preferencia por ningún plano horizontal especial en el que vibrar; puede hacerlo de norte a sur o de este a oeste o en cualquier otra dirección intermedia. Lo que importa en los cristales polarizados es que sólo son transparentes a la luz que vibra en un determinado plano. Al examinar la luz que brota de tal polarizador, encontramos que toda

vibra en un plano concreto, de manera que éste actúa como un filtro que sólo permite el paso de la luz que vibra en el plano elegido. Esta luz se denomina «polarizada». Como es natural, somos libres de elegir el plano de polarización girando el polarizador.

Supongamos ahora que colocamos un segundo polarizador detrás del primero. Si sus dos planos se sitúan en paralelo, toda la luz que pasa por el primero también atraviesa el segundo, puesto que este último acepta la luz con su misma polarización. Por el contrario, cuando el segundo polarizador se sitúa perpendicularmente al primero no pasa ninguna luz (véase Figura 15). Por último, si el segundo polarizador se coloca en ángulo agudo entre ambas posiciones extremas, entonces parte de la luz, pero no toda, atravesará el segundo polarizador. Esta es la razón, dicho sea de paso, de que se utilicen polarizadores en las gafas de sol, porque una buena parte del brillo que se refleja en el cristal o en el agua, y también parte del brillo del cielo, queda parcialmente polarizado por el proceso de la reflexión, de modo que, a menos que las gafas de sol se sitúen en el plano de esta luz polarizada, bloquean una buena parte de la misma.

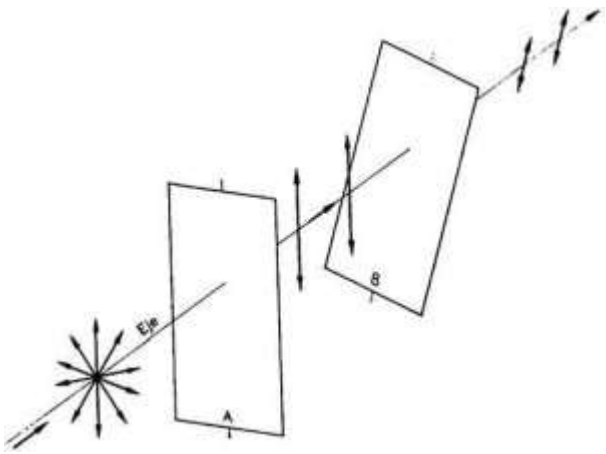

Figura 15. Polarizadores. Las ondas luminosas vibran perpendicularmente a su línea de movimiento. La luz ordinaria es una superposición de vibraciones en todas direcciones, pero al pasar por el polarizador A sólo permanece un plano de vibración. Esta luz se denomina polarizada. Cuando la luz polarizada choca oblicuamente con un segundo polarizador (B), sólo una fracción de esa luz lo atraviesa. La transparencia de B depende de su ángulo: si es paralelo a A, toda la luz polarizada pasa; si es perpendicular, no lo atraviesa ninguna.

La razón de que el polarizador siga aceptando por lo menos una fracción de la luz que vibra oblicuamente con respecto a él puede entenderse mediante una analogía con la acción de empujar un coche (véase capítulo 3). La vibración de la luz también es un vector y, si coincide con el ángulo del polarizador, entonces lo atraviesa, pero si es perpendicular, no pasa: la luz queda bloqueada. Lo que importa aquí es que es posible empujar un coche con moderada eficacia mediante una fuerza oblicua, pongamos, al tiempo que se

apoya uno contra la puerta del conductor con objeto de poder manejar el volante.

Cuanto más cerrado sea el ángulo de empuje con respecto a la línea de movimiento, más eficaz será la respuesta del vehículo. Del mismo modo, la luz oblicuamente polarizada también tiene efectos parciales: una parte de la luz pasa.

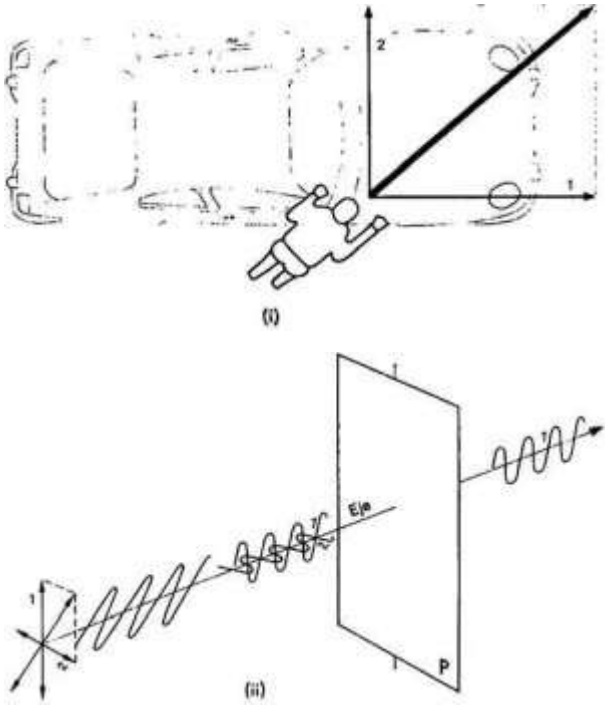

Figura 16. Resolución de vectores. La fuerza oblicua (flecha gruesa) puede interpretarse como dos fuerzas más débiles superpuestas: una componente (1) que se orienta en el sentido de la marcha y es la que empuja el coche, y una componente perpendicular (2) que queda bloqueada. Las fuerzas relativas de 1 y 2 dependen del ángulo en que se empuje. De modo similar, una onda de luz polarizada puede describirse como dos ondas más débiles superpuestas: una (1) vibra

paralelamente al polarizador (P) y lo atraviesa; la otra (2) es perpendicular con respecto al polarizador y resulta bloqueada.

Considerar que el vector está compuesto de dos componentes, ayuda a entender este logro parcial. En el caso de la luz, esto significa considerar que la onda luminosa consta de dos ondas superpuestas, una de las cuales vibra paralelamente al plano del polarizador mientras la otra ondula en posición vertical. Cuanto más cerrado es el ángulo de polarización con respecto al plano del polarizador, mayor será la proporción de la primera onda a expensas de la segunda. El paso de una fracción de luz oblicuamente polarizada a través del polarizador resulta ahora fácil de entender: la onda de la componente paralela lo atraviesa íntegramente, pero toda la onda perpendicular queda bloqueada (véase Figura 16). Estos experimentos tan razonables adoptan un aspecto algo peculiar cuando se tiene en cuenta la naturaleza cuántica de la luz, pues el rayo de luz consiste en realidad en una corriente de fotones, cada uno de los cuales tiene su propio plano de polarización. Como sabemos que ningún fotón individual se puede dividir en dos componentes, debemos concluir que el fotón oblicuamente polarizado pasa o es bloqueado según una cierta probabilidad. Por ejemplo, un fotón de 45º tiene el cincuenta por ciento de probabilidades de pasar. Sin embargo —y esto es de crucial importancia—, una vez que ha pasado el fotón debe emerger con una polarización paralela a la del polarizador puesto que, como

ya hemos visto, la luz que ha atravesado el polarizador emerge completamente polarizada en el mismo plano.

La conclusión es que, cuando el fotón interacciona con el polarizador, su plano de polarización cambia para adaptarse al del polarizador. Podemos hacerlo pasar (con una cierta probabilidad) por un segundo, un tercero o más polarizadores, cada uno de ellos relativamente inclinado con respecto al anterior, y cada vez, al atravesarlos, el fotón saldrá con un nuevo plano de polarización. De hecho, se puede inclinar el plano hasta hacerlo perpendicular al plano original. Es como si cada vez que el fotón chocase con el polarizador, fuera golpeado o arrojado a una nueva condición de polarización. Si consideramos el polarizador como un burdo instrumento de medir o un detector de fotones, podemos decir que existen dos posibles resultados de la medición: o bien el fotón pasa o bien queda bloqueado. Todo lo que sabemos con seguridad es el estado del fotón una vez aceptado, pues entonces sabemos que está polarizado en el mismo plano que el polarizador. Si nos preguntamos cuál es la polarización del fotón antes de hacer la medición, es decir, antes de que emerja del polarizador, entonces se plantea una dificultad, pues al parecer el polarizador ha perturbado el estado del fotón e impuesto su propio plano. Sin embargo, se podría seguir argumentando que el fotón tenía «realmente» un determinado estado de polarización antes de la medición, pero que debido a la tosquedad del polarizador esa información se esfumó cuando el fotón chocó con el polarizador.

Considérese, por ejemplo, un fotón de 45º que tiene el cincuenta por ciento de probabilidades de atravesar el polarizador. Da la impresión de que el polarizador tiene éxito en corregir por término medio a la mitad de los fotones; los restantes quedan descartados y no lo atraviesan.

Llegamos ahora al punto central del razonamiento de Einstein-Podolsky-Rosen. Supongamos que, en lugar de un fotón, estudiamos dos que se desplazan en sentidos contrarios, emitidos como consecuencia de la desintegración de otra partícula, o de la descomposición de un átomo, como se ha explicado en las págs. 141 y siguientes del presente texto. Así como las leyes fundamentales de la mecánica exigen que los dos fotones roten uno en el sentido de las agujas del reloj y otro en el sentido contrario, también las polarizaciones deben estar correlacionadas: por ejemplo, pueden ser paralelas. Esto significa que la medición de la polarización de un fotón nos dice inmediatamente la del otro, sin que importe la distancia a que se encuentre situado en el tiempo. Pero ya hemos visto que el resultado de una medición sólo puede ser «sí» o «no», según que el fotón pase o no pase a través de un polarizador. Sólo podemos afirmar el estado en que se halla el fotón después de que haya tenido lugar la medición, es decir, cuando emerge del polarizador, y eso es cierto cualquiera que sea el ángulo en que situemos el polarizador. Sólo podemos detectar los fotones en uno de estos dos estados: paralelos o perpendiculares al polarizador (que corresponden a «sí» y «no»). No obstante, la elección de cuáles dos

estados dependen absolutamente de nosotros; el polarizador puede orientarse arbitrariamente. Las consecuencias verdaderamente desconcertantes de esta libertad resultan patentes si utilizamos dos polarizadores paralelamente orientados e interponemos uno de ellos en la trayectoria de cada uno de los fotones correlacionados. Puesto que imponemos polarizaciones paralelas, cualquiera que sea la medida de la polarización del fotón en uno estamos obligados a encontrar la misma en el otro, pero como en realidad sólo hay dos estados de polarización medibles (es decir, paralelo y perpendicular), la decisión «sí»-«no» de un polarizador debe ser idéntica a la del otro. Es decir, cada vez que uno de los fotones pasa por un polarizador, el otro debe permitir que también lo atraviese el otro fotón, y siempre que se bloquee uno de los fotones, lo mismo debe ocurrirle al otro (véase Figura 17).

Figura 17. Paradoja de Einstein-Rosen-Podolsky. Un átomo envía simultáneamente dos fotones hacia dos polarizadores paralelos. Si A deja pasar a su fotón, lo mismo hace B. ¿Cómo sabe B lo que ha hecho A? A y B pueden estar a años luz de distancia, y lo mismo da que el fotón pase primero por A o por B. Bohr sacó la conclusión de que los fotones no son verdaderamente reales hasta que tropiezan con el polarizador.

Por singulares que puedan parecer estas ideas, han sido cuidadosamente comprobadas mediante experimentos de laboratorio y se han comprobado los detalles aquí descritos.

La profunda peculiaridad de este resultado es evidente cuando se comprende que los fotones pueden haberse alejado millones de kilómetros en el momento en que chocan con los respectivos polarizadores, pero que sin embargo siguen cooperando en cuanto a su comportamiento. El misterio consiste en ¿cómo «sabe» el segundo polarizador que el primero ha dejado pasar el fotón, para poder hacer lo mismo?

Los experimentos pueden realizarse simultáneamente, en cuyo caso estamos seguros, basándonos en la teoría de la relatividad, de que ningún mensaje puede transmitirse a mayor velocidad de la que se mueven los propios fotones entre los polarizadores que diga: «déjesele pasar». De hecho, situando los polarizadores a distintas distancias del átomo en desintegración podemos arreglárnoslas para que un experimento ocurra antes que el otro, descartando en consecuencia toda posibilidad de que un polarizador transmita la señal al otro o dé lugar a que éste acepte o rechace el fotón. En realidad, la teoría de la relatividad permite que observadores en distintas condiciones de movimiento estén en desacuerdo sobre el orden temporal de dos acontecimientos muy alejados, de modo que si se alegara que el polarizador A hace que el B acepte o rechace como consecuencia de su propia decisión, ¡quien se moviera de distinta manera podría ver que B acepta o rechaza a A antes de que

tan siquiera sepa qué hacer con su fotón!

Estas observaciones ponen en claro que la indeterminación del micro mundo no puede ser obra del aparato de medición, ni tampoco de los bamboleos aleatorios que sufren los fotones en su camino, pues entonces no habría ninguna razón para que dos polarizadores distintos cooperaran de esta llamativa manera en bloquear o dejar pasar al unísono a sus respectivos fotones. Si cada fotón recibiera su plano de polarización al azar, no habría razón para que llegasen a sus respectivos polarizadores situados exactamente en el mismo plano.

Sería de esperar que, como media, la mitad de los fotones fueran aceptados por un polarizador cuando el otro rechaza su fotón, pero esto está en clara contradicción con las anteriores predicciones de la teoría cuántica y con los experimentos que las han verificado. La conclusión debe ser que la incertidumbre subatómica no es una mera consecuencia de nuestra ignorancia sobre las micro fuerzas, sino que es inherente a la naturaleza: una absoluta indeterminación del universo.

El experimento Einstein-Rosen-Podolsky tiene asombrosas implicaciones sobre la naturaleza de la realidad si se toma literalmente. Sólo es posible retener un último vestigio de sentido común alegando que, cuando ambos polarizadores colaboran misteriosamente en aceptar simultáneamente a los fotones, será porque tales fotones están en todo momento «realmente» polarizados de forma exactamente paralela a los polarizadores, lo que asegura

su paso final por los respectivos polarizadores, y que los bloqueados estaban «realmente» vibrando siempre perpendicularmente a los polarizadores. Pero el absurdo de este último y desesperado intento de aferrarse al mundo «real» no radica únicamente en el hecho de que el átomo original debe estar obligado a saber en qué ángulo se colocan los polarizadores, sino que incluso podemos alterar ese ángulo después de que los fotones hayan sido emitidos. Es difícil de concebir que el comportamiento del átomo pueda estar influido por nuestra decisión de experimentar en algún momento futuro sobre el fotón que emite. Como todos los demás átomos emiten afortunadamente fotones con toda clase de polarizaciones, de modo perfectamente aleatorio cuesta creer que nuestros caprichos experimentales afecten a uno en concreto, sobre todo teniendo en cuenta que podemos elegir detectar fotones de átomos situados a millones de años luz de distancia, al final del universo.

Si no bastaran estas objeciones, es posible demostrar matemáticamente que si los fotones estuvieran realmente o bien en un estado (paralelo a los polarizadores) o bien en el otro (perpendicular), entonces la cooperación «sí-no» fallaría. La correlación entre los dos polarizadores sólo puede lograrse si la onda que describe el fotón es una genuina superposición de ambas alternativas.

La naturaleza ondulatoria de los procesos cuánticos participa en todo esto de manera vital. Para eliminar absurdos como que los átomos prevean nuestros experimentos, supongamos que

disponemos de un rayo de fotones polarizado en un plano concreto por el sistema de haberlo hecho pasar previamente por un polarizador. Cuando los fotones se aproximan a otro polarizador que está inclinado con respecto al primero, pueden ser aceptados o bien rechazados, según una determinada probabilidad que depende de manera aritméticamente simple del ángulo de inclinación. Si es de 45º pasarán por término medio la mitad de los fotones. Desde esta perspectiva, cabe imaginar que el rayo polarizado está compuesto de dos ondas de la misma fuerza, una paralela y otra perpendicular al segundo polarizador. Estas dos ondas deben ir «juntas» con objeto de constituir la onda original polarizada sin inclinación. Los efectos de interferencia entre las dos ondas desempeñan una función esencial. No es posible decir que la onda paralela ni la perpendicular existan solas, pues eso contradice el hecho que ya conocemos que la onda no está polarizada paralela ni perpendicularmente al segundo polarizador, sino con un ángulo de 45º. Cuando se trata de un único fotón las implicaciones son fantásticas. No es posible decir que este fotón tenga una polarización paralela ni perpendicular respecto al polarizador, pero, puesto que la interferencia de la onda sigue existiendo incluso para una sola partícula, «ambas» posibilidades deben coexistir y superponerse. Además, el ángulo del polarizador, y de ahí la combinación relativa de las dos alternativas, ¡depende por completo del control del experimentador! Hay que subrayar que la indeterminación cuántica no significa simplemente que no podamos

saber cuál es el plano de polarización que realmente posee el fotón: significa que la idea de un fotón con un plano concreto de polarización es algo que no existe. Hay una incertidumbre inherente en la identidad del mismo fotón, no sólo en nuestro conocimiento del fotón. Del mismo modo, cuando se dice que no estamos seguros de la localización de un electrón, no se trata simplemente de que el electrón «esté» en un sitio u otro, que nosotros no podemos asegurar. La incertidumbre se refiere a la misma identidad del «electrón-en-un-sitio».

Dentro del espíritu de la idea de superespacio, podemos considerar las ondas de los fotones como representaciones de dos mundos, uno en el que el segundo polarizador acepta el fotón y otro en el que es rechazado. Además, estos dos mundos pueden ser muy distintos, pues el fotón aceptado puede proseguir y disparar, por ejemplo, un detonador que haga explotar una bomba de hidrógeno. No obstante —y ésta es la culminación del largo análisis de este capítulo—, estos dos mundos no son realidades independientes. No son mundos «alternativos»; se superponen entre sí. Es decir, los cruciales efectos de interferencia causados por la superposición de las dos ondas demuestran que, antes de que el segundo polarizador decida sobre el sino del fotón, ambos mundos están combinados. Sólo cuando por fin el polarizador decide, los dos mundos se convierten en alternativas distintas de «realidad». El efecto de la medición Por el segundo polarizador consiste en separar los mundos superpuestos en dos realidades alternativas desconectadas.

Hemos llegado ahora a una cierta idea de la naturaleza de la realidad concorde con las interpretaciones habituales de la teoría cuántica, pero se trata de una pálida sombra de la imagen de sentido común. La indeterminación del micro mundo no es una mera consecuencia de nuestra ignorancia (como ocurre con el clima) sino que es absoluta. No nos encontramos con una simple elección entre alternativas, tal como la imprevisibilidad del cara/cruz en la vida diaria, sino con un genuino híbrido de ambas posibilidades. Hasta que hemos hecho una observación concreta del mundo, carece de sentido adscribirle una realidad concreta (o incluso diversas alternativas), pues se trata de una superposición de diversos mundos. En palabras de Niels Bohr, uno de los fundadores de la teoría cuántica, hay «limitaciones básicas, que percibe la física atómica, en la existencia objetiva de fenómenos independientes de los medios con que son observados». Sólo cuando se ha hecho la observación se reduce este estado esquizofrénico a algo que pueda llamarse verdaderamente real.

En el capítulo anterior se explicó cómo el mundo que observamos es un corte o una proyección de un superespacio de infinitas dimensiones, de una inmensa masa de mundos alternativos. Vemos ahora que el mundo que observamos no es exactamente una selección aleatoria del superespacio, sino que depende de modo crucial de todos los demás mundos que no vemos. Así como la correlación «sí»/«no» entre los dos polarizadores separados depende crucialmente de la interferencia entre el mundo del «sí» y el mundo

del «no», del mismo modo en cualquier otra interacción, en cada átomo perdido, en cada microsegundo, todos los mundos-que-nunca-existieron dejan un vestigio de su realidad putativa en nuestro propio mundo por su efecto sobre las probabilidades de todos estos procesos subatómicos. Sin los otros mundos del superespacio, el cuanto fallaría y el universo se desintegraría; estas innumerables alternativas que se disputan la realidad ayudan a dirigir nuestro propio destino.

Según estas ideas, la realidad sólo tiene sentido dentro del contexto de una medición u observación prescrita. Por regla general, no podemos decir que un electrón, ni un fotón ni un átomo, se estaban comportando realmente de tal o cual modo antes de haberlo medido. La única realidad es el sistema total de partículas subatómicas más el aparato y el experimentador, pues cuando el experimentador decide, por ejemplo, girar su polarizador, cambia los mundos alternativos.

Cada vez que alguien con gafas polarizadas hace un movimiento de cabeza, reordena la selección de mundos del superespacio. Puede optar entre crear un mundo de fotones orientados de norte a sur, de este a oeste o cualquier otro que se le ocurra.

De ahí se deduce que el observador está inserto en la realidad de una manera fundamental: al elegir el experimento, elige las alternativas que se ofrecen. Cuando cambia de idea, cambia la selección de los mundos posibles. Por supuesto, el experimentador no puede seleccionar exactamente el mundo que quiere, pues los

mundos siguen sometidos a las leyes probabilísticas, pero puede influir en la selección disponible. En suma, no podemos cargar los dados, pero sí decidir a qué queremos jugar.

Hay que aceptar pues que la participación del observador en su propia realidad es mucho más profunda que la clásica imagen newtoniana del mundo en la que el observador está incrustado en la realidad pero sólo como un autómata cuyos actos vienen totalmente determinados por las leyes de la mecánica. En la versión cuántica, hay una indeterminación inherente y la realidad concreta sólo aparece dentro del contexto de un tipo concreto de medición u observación. Sólo cuando se ha especificado el montaje experimental (por ejemplo, qué ángulo se escoge darle al polarizador) pueden especificarse las posibles realidades. Algunos científicos han sugerido que al desacreditar la idea newtoniana de un universo mecánico habitado por observadores que son meros autómatas, la teoría cuántica restaura la posibilidad del libre albedrío. Si en cierto sentido el observador escoge su propia realidad, ¿no equivale eso a la libertad de elección y a la capacidad de reestructurar el mundo según nuestro capricho? Aunque la respuesta puede ser afirmativa, debemos recordar que en la teoría cuántica el observador (o experimentador) no puede determinar, por regla general, el resultado de ningún experimento concreto. Como ya hemos subrayado, la única elección de que disponemos es entre varios resultados alternativos, no sobre cuál de las alternativas se realizará. Así pues, es posible decidir la creación de un mundo en

que unos fotones estén polarizados de norte a sur o de este a oeste, o bien otro mundo en que estén polarizados de nordeste a sudoeste o de noroeste a sudeste, etc. No obstante, no se puede elegir cuál de las dos posibilidades ocurrirá en cada caso. No nos es posible obligar a un fotón polarizado de manera aleatoria a que lo esté de norte a sur en lugar de estarlo de este a oeste, porque no podemos obligarlo a pasar por un polarizador orientado de norte a sur. Del mismo modo, podemos elegir medir la posición o el impulso de una partícula, pero no ambas cosas. Después de la medición, la partícula tendrá un valor bien determinado de una u otra cosa, según el experimento que hayamos elegido.

Al parecer nos encontramos en una situación en que el universo está en una especie de estado esquizofrénico latente hasta que alguien lleva a cabo una observación, pues entonces se «colapsa» repentinamente en realidad. Además, como ha subrayado el dilatado tratamiento anterior de los dos fotones correlacionados que se desplazan en direcciones opuestas, el colapso en realidad no ocurre únicamente en el plano local (es decir, en el laboratorio), sino también, súbita e instantáneamente, en regiones distantes del universo. Sabemos por la teoría de la relatividad que observadores distintos suelen estar en desacuerdo sobre qué es lo instantáneo, de modo que el acceso a la realidad parece ser exclusivamente una cuestión individual. En consecuencia, no es posible utilizar este colapso como instrumento para transmitir señales entre dos observadores distantes.

Según la relatividad, toda señal enviada a mayor velocidad que la de la luz amenazaría el principio de causalidad, pues en ese caso no sólo sería posible enviar una señal de respuesta instantánea desde el punto de vista del otro observador, sino incluso enviar señales al propio pasado. Esta posibilidad plantea horribles paradojas en relación con las máquinas «autocidas» que están programadas para autodestruirse a las dos en punto si reciben a la una, una señal que ellas mismas han transmitido a las tres. Si se destruyen a las dos, no pueden transmitir a las tres, de tal modo que no se recibe ninguna señal y no se produce ninguna destrucción. Pero si no se produce ninguna destrucción, entonces se envía la señal y se produce la destrucción. Esta evidente contradicción parece regir la comunicación que retrocede en el tiempo y, por tanto, los mensajes más rápidos que la luz.

En el caso cuántico, hemos visto que el paso de un fotón por un polarizador en un lugar, puede asegurar el paso de otro fotón por otro polarizador situado en otro lugar, quizás a miles de kilómetros de distancia, en el mismo momento (en relación con un experimento concreto) o bien, de hecho, incluso «antes» de ese momento. A pesar de esta sorprendente propiedad, el experimentador no tiene control sobre ninguno de los fotones individuales, debido a la incertidumbre cuántica, de manera que no le es posible convenir con un colega distante que, por ejemplo, el paso de tres fotones consecutivos por el polarizador significa que el Everton ha ganado la Copa de fútbol. Por tanto, la teoría de la relatividad se mantiene intacta y la

posibilidad de comunicarse por el universo a mayor velocidad que la luz, con su consiguiente amenaza a la causalidad, sigue siendo ilusoria.

Aunque los sistemas distantes, como el de nuestros dos fotones y polarizadores, no pueden vincularse mediante ningún tipo convencional de canal comunicativo, tampoco se pueden considerar entidades separadas. Aunque los dos polarizadores estén en distintas galaxias, inevitablemente constituyen un único dispositivo experimental y una única versión de la realidad.

En la concepción intuitiva del mundo consideramos que dos cosas tienen identidades distintas cuando están tan alejadas que su mutua influencia es despreciable. Dos personas o dos planetas, por ejemplo, se consideran cosas distintas, cada cual con sus propios atributos. Por el contrario, la teoría cuántica propone que, al menos hasta haber hecho la observación, el sistema que nos interesa no se puede considerar un conjunto de cosas distintas sino un todo unificado e indivisible. Así pues, los dos polarizadores distantes y sus respectivos fotones no son realmente dos sistemas aislados con propiedades independientes, sino que están enigmáticamente vinculados por los procesos cuánticos.

Sólo una vez hecha la observación puede considerarse que el fotón lejano adquiere identidad diferenciada y existencia independiente.

Además, ya hemos visto cuán falto de sentido es asignar propiedades a los sistemas subatómicos en ausencia de un dispositivo experimental preciso. No podemos decir que un fotón

tenga «realmente» tal o cual polarización antes de haberla medido. Por tanto, es incorrecto considerar la polarización del fotón como una propiedad del fotón; es más bien un atributo que debe asignarse a ambos fotones y al dispositivo macroscópico experimental. De ahí se deduce que el micro mundo sólo tiene propiedades en la medida que las comparte con el macro mundo de nuestra experiencia.

La verdadera amenaza a nuestra concepción intuitiva de la realidad se produce cuando se tiene en cuenta la naturaleza atómica de toda la materia. Podríamos tener la sensación de que los resultados de los oscuros experimentos sobre fotones polarizados tienen escasa relevancia para nuestra vida cotidiana, pero todas las cosas conocidas que nos rodean —todos los cuerpos materiales— están compuestos de átomos, sujetos a las leyes de la teoría cuántica. En cualquier puñado de materia ordinaria hay miles de millones de billones de átomos, que chocan entre sí a razón de millones de veces por segundo.

De acuerdo con las ideas que hemos esbozado, cuando dos partículas microscópicas se influyen mutuamente, aunque se separen, no pueden considerarse cosas reales independientes, sino que están correlacionadas, aunque habitualmente de manera mucho más compleja que los dos fotones de que nos hemos ocupado. De ahí se sigue que, a todo lo ancho del universo, los sistemas cuánticos están emparejados de este extraño modo en una gigantesca congregación indivisible. La creencia original de los

antiguos griegos de que toda la materia está compuesta de átomos individuales e independientes parece ser una burda simplificación, pues los átomos no tienen realidad considerados de uno en uno. Sólo en el contexto de nuestras observaciones macroscópicas tiene sentido su realidad. Pero nuestras observaciones están enormemente limitadas, tanto a los rasgos más toscos de la materia —pues rara vez observamos los átomos individuales, excepto en experimentos especiales como a nuestra pequeña parcela del universo. Llegamos, pues, a una imagen en la que la inmensa mayor parte del universo no puede considerarse real, en el sentido tradicional de la palabra. De hecho, John Wheeler ha llegado a afirmar que el observador crea literalmente el universo con sus observaciones:

> *¿Ha de resultar el propio mecanismo de la existencia del universo sin sentido o inviable, o ambas cosas, a no ser que el universo tenga la garantía de producir vida, conciencia y observación en alguna parte y durante algún breve período de su historia futura? La teoría cuántica demuestra que, en un cierto sentido, lo que el observador haga en el futuro determina lo que ocurre en el pasado, incluso en un pasado tan remoto en que no existía la vida, y aún demuestra más: que la «observación» es un requisito previo de cualquier versión útil de la «realidad».*

No es necesario decir que estas ideas radicales sobre la realidad,

incorporadas en la teoría cuántica han dado lugar a décadas de controversia y polémica. Si bien quedan pocas dudas sobre el éxito alcanzado por la teoría en el plano operativo —los físicos no tienen dudas sobre cómo calcular realmente las propiedades de los átomos, las moléculas y la materia subatómica utilizando esta teoría—, sin embargo, los aspectos epistemológicos y metafísicos de la física cuántica siguen causando nerviosismo. La interpretación descrita en este capítulo se debe principalmente a Niels Bohr, que fue uno de los creadores de la teoría cuántica.

Se le suele denominar la interpretación de la escuela de Copenhague, por el grupo de Bohr radicado en Dinamarca, y es probablemente una de las más aceptadas por los físicos. No obstante, algunos han entendido que contiene ideas paradójicas, incompletas o insensatas. Albert Einstein, en especial, pensaba que la teoría era incompleta porque no podía comprender cómo un fotón y un polarizador lejanos podían ser inducidos a responder de acuerdo con el comportamiento de un fotón y un polarizador cercanos. ¿Cómo puede «saber» el lejano si debe aceptar o rechazar el fotón sin algún complicado mecanismo que se lo indique, que necesariamente quebrantaría los principios de la teoría de la relatividad del propio Einstein al ser más rápido que la luz?

En réplica al rechazo de Einstein, Bohr sostuvo que los sistemas microscópicos no tienen propiedades intrínsecas de ninguna clase, de modo que es innecesario considerar que el estado de un fotón le sea indicado a otro, pues después de todo un fotón aislado no tiene

en absoluto estado. Sólo el experimento global tiene sentido.

Bohr propuso que la única realidad verdadera es la que puede comunicarse en lenguaje llano entre las personas, como es la descripción del clic de un contador Geiger o el paso de un fotón por un polarizador. Todo planteamiento sobre lo que está «realmente» haciendo un fotón, un átomo, etc., sólo puede afrontarse en el marco de un dispositivo experimental concreto y real. Refiriéndose a estas condiciones experimentales, que determinan el tipo de propiedades que se pueden medir, Bohr sostuvo que «constituyen un elemento inherente de... la realidad física». De este modo eludió las objeciones de Einstein.

A pesar del atractivo de la interpretación de Copenhague y de los habilidosos argumentos de Bohr, algunos físicos siguen encontrando las ideas en cuestión paradójicas, porque basan la realidad en los conceptos clásicos de los aparatos experimentales que en sí mismos están desacreditados por la teoría cuántica.

La física newtoniana clásica —la física del lenguaje llano y diario, de los objetos de sentido común que Bohr desea utilizar— sabemos que es falsa. Utilizar un lenguaje llano para definir la realidad microscópica parece, pues, una incoherencia. En el próximo capítulo veremos que se han propuesto otras interpretaciones de la teoría cuántica con consecuencias aún más fantásticas.

Capítulo VII
Mente, materia y mundos múltiples

Hemos visto cómo la teoría cuántica ha socavado la noción intuitiva o de sentido común de la realidad objetiva y ha colocado al observador y sus experimentos en el centro de la definición de cualquier idea válida del mundo real «exterior». No obstante, sigue habiendo cierta vaguedad sobre qué es exactamente lo que constituye un «observador» y qué clases de procesos físicos participan en su «observación». La interpretación de la escuela de Copenhague utiliza mucho el «aparato experimental». ¿Qué es éste exactamente?

Un laboratorio bien pertrechado está equipado con numerosos instrumentos para sondear la estructura de los átomos y de sus componentes. Algunos nos son conocidos: tubos de rayos X, contadores Geiger, cámaras de vacío, aceleradores de partículas de gran energía y placas fotográficas. No obstante, todos estos aparatos, por no hablar de los técnicos del laboratorio, están compuestos de átomos, e incluso Bohr concede que asimismo deben estar sometidos a las minúsculas incertidumbres que caracterizan la física cuántica.

No hay una línea divisoria clara entre los sistemas microscópicos y los instrumentos macroscópicos de medición. Los procesos cuánticos pueden observarse en moléculas que contienen muchos átomos y pueden ser prominentes incluso en cantidades visibles de

fluidos y metales. El fenómeno de la superconductibilidad, por ejemplo, en que los electrones de un metal se combinan en parejas y cooperan a escala macroscópica para crear un flujo de corriente eléctrica completamente carente de resistencia, es un ejemplo de efectos cuánticos en el plano de la ingeniería. Sin duda, no es posible señalar una cosa y decir «que es microscópica y está sometida a la teoría cuántica» o «que es macroscópica y está sometida a la física clásica de Newton».

Si todos los sistemas son, en último término, de naturaleza cuántica, una paradoja parece envolver el acto de medir. Para centrar las ideas, tomemos un ejemplo sencillo: la observación de un núcleo atómico radiactivo. Tal núcleo emitirá una o más partículas subatómicas que pueden detectarse en un contador Geiger: si el contador emite un clic esto significa que se ha desintegrado un núcleo; si no, el núcleo está intacto. En lugar del clic, hay contadores equipados con indicadores que oscilan sobre una escala graduada: si el indicador se mantiene en la posición A, el núcleo está intacto; si salta, pongamos, a la posición B, se ha detectado una partícula y podemos deducir que el núcleo se ha desintegrado. Por tanto, la posición del Indicador está correlacionada con la condición del núcleo de una manera simple. Observando el indicador observamos de manera eficaz el núcleo.

Toda medición conlleva el par de elementos aquí descrito, que constituye una parte indispensable del proceso de observación, es decir, la correlación entre las condiciones microscópicas del sistema

que nos interesa y ciertos estados macroscópicos visibles del aparato, y la ampliación de los diminutos efectos cuánticos para producir alguna clase de cambio a gran escala, como es la desviación del indicador. Según la física cuántica, el estado del sistema microscópico debe describirse como una superposición de ondas, cada una de las cuales representa un determinado valor de alguna propiedad, como la posición, el impulso, el «spin» o la polarización de una partícula. Es vital recordar que la superposición no representa un conjunto de alternativas —una elección excluyente—, sino una genuina combinación superpuesta de realidades posibles. La verdadera realidad sólo queda determinada cuando se ha efectuado la medición de aquellas propiedades. No obstante, aquí yace el problema. Si el aparato de medición también está compuesto de átomos, también debe describirse como una onda compuesta de una superposición de todos sus estados alternativos. Por ejemplo, nuestro contador Geiger es una superposición de los estados A y B (indicador no desviado e indicador desviado), lo cual, repetimos, no significa que «o bien» está desviado «o bien» no está desviado, sino de un modo extraño y esquizofrénico «ambas» cosas a la vez.

Cada una de ellas representa una realidad alternativa generada por la desintegración del núcleo, pero estas realidades no sólo coexisten, también se superponen o interfieren entre sí mediante el fenómeno de la interferencia de las ondas.

La razón de que no percibamos la superposición de «otras

realidades» con la nuestra se debe a que, al tamaño del aparato de laboratorio, el efecto de interferencia es casi infinitésimamente pequeño. Mientras que en el interior de los átomos los mundos alternativos se empujan vigorosamente unos a otros, a la escala cotidiana sus influencias mutuas son casi inexistentes. Pero no completamente inexistentes. Si realmente creemos que la teoría cuántica se aplica a los objetos macroscópicos, entonces hemos de conceder que estas influencias, por pequeñas que sean, de las realidades superpuestas invaden nuestro mundo. Tratándose de tan profundas cuestiones teóricas, la pequeñez del efecto poco importa, pues en teoría podremos detectar tal interferencia utilizando aparatos suficientemente complejos y delicados.

Hasta este momento tenemos una imagen del universo en forma de superposición de realidades extendidas por el superespacio, que son separadas en mundos desconectados y alternativos en cuanto se hace una observación. Ahora vemos que el mecanismo de separación no es del todo efectivo y que algunos diminutos hilos siguen conectando nuestro mundo con los demás mundos del superespacio. La separación sólo puede ser total, y la realidad hacerse completamente objetiva, cuando se utiliza un instrumento verdaderamente no cuántico para la medición, pues en otro caso siempre quedarán interferencias residuales entre los distintos mundos. Pero ¿existe algún sistema que verdaderamente no sea cuántico? Si lo hay puede utilizarse para transgredir las normas de la teoría cuántica; si no lo hay, no puede haber ninguna realidad.

¿Cómo escapar a este dilema?

En la década de 1930 el matemático John Von Neumann investigó con gran detalle el proceso de medición cuántica. Sostuvo en términos matemáticos que cuando un sistema microscópico se empareja con un instrumento de medida macroscópico, el efecto del emparejamiento consiste en hacer que el sistema microscópico se comporte como si estuvieran ausentes los efectos de interferencia. Es decir, el estado del microsistema parece reducirse de una superposición de estados a un conjunto genuino de posibilidades alternativas excluyentes. Por desgracia, este análisis no equivale a una demostración de la «reducción» a una realidad, puesto que otro resultado del emparejamiento consiste en transferir efectos de interferencia al aparato medidor, y para que el aparato se «reduzca» a una realidad, otro sistema debe hacer otra medición del aparato. Pero el mismo razonamiento puede extenderse al siguiente sistema, requiriéndose entonces otro instrumento para medir ese instrumento, y así sucesivamente, al parecer, hasta el infinito.

¿Dónde termina esta cadena? Erwin Schrödinger, el inventor de la teoría ondulatoria de la mecánica cuántica, llamó la atención sobre una curiosidad que ha llegado a conocerse como la paradoja del gato. Supongamos un microsistema compuesto de un núcleo radiactivo que puede desintegrarse o no al cabo de, pongamos, un minuto, según las leyes de la probabilidad cuántica. La desintegración la registra un contador Geiger, que a su vez está conectado a un martillo, de tal modo que si el núcleo se desintegra y

se produce la respuesta del contador, se libera un disparador que hace que el martillo caiga y rompa una cápsula de cianuro. Todo el conjunto está colocado dentro de una caja sellada junto con un gato. Al cabo de un minuto, hay el cincuenta por ciento de probabilidades de que el núcleo se haya desintegrado. Pasado el minuto el instrumento se desconecta automáticamente. ¿Está el gato vivo o muerto?

La respuesta podría parecer que consistiera en que hay un 50% de probabilidades de que el gato esté vivo cuando miremos en la caja. No obstante, si seguimos a Von Neumann y aceptamos que las ondas superpuestas que representan el núcleo desintegrado y el núcleo intacto están correlacionadas con las ondas superpuestas que describen al gato, entonces una onda del gato corresponde al «gato vivo» y la otra al «gato muerto». El estado del gato, al cabo de un minuto, no puede ser o bien «vivo» o bien «muerto» debido a esta superposición. Por otra parte, ¿qué sentido podemos darle a un gato vivo-y-muerto?

A primera vista, parece que el gato sufre uno de esos curiosos estados esquizofrénicos de que hemos hablado extensamente en el capítulo anterior, y su sino sólo queda determinado cuando el experimentador abre la caja y mira para comprobar el estado de salud del gato. No obstante, como es posible retrasar este último paso tanto como se quiera, el gato puede perdurar en esta animación suspendida hasta que finalmente sea expulsado de su purgatorio o resucitado a la plena vida por la obligada pero

caprichosa curiosidad del experimentador.

El aspecto insatisfactorio de esta descripción es que el propio gato, presumiblemente, sí sabe si está vivo o muerto mucho antes de que nadie mire dentro de la caja.

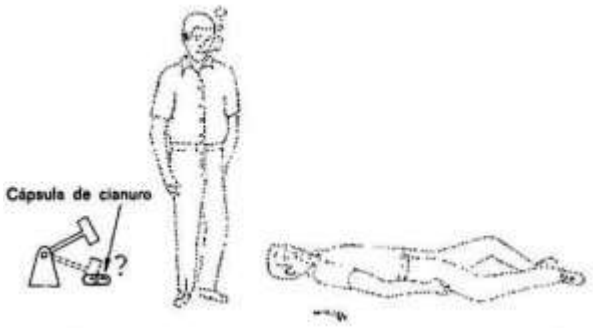

Figura 18. La paradoja del amigo de Wigner. El martillo radiactivamente controlado tiene cierta probabilidad de romper la cápsula de cianuro. Así que ¿está vivo o muerto el hombre que hay en la caja? La teoría cuántica dice que ambas cosas: los dos mundos del superespacio coexisten y se superponen. Sólo cuando Wigner mire en el interior de la caja los mundos se desemparejarán y uno de ellos se hará real. Pero ¿cómo se siente su amigo en la esquizofrénica situación de irrealidad anterior al vistazo de Wigner?

Cabría alegar que el gato no es un observador propiamente dicho, en la medida en que no tiene la completa conciencia de su propia existencia de que disfruta el hombre, de manera que sería demasiado corto de luces para saber si está muerto, vivo o vivo-y-muerto. Para eludir esta objeción, podemos sustituir al gato por un voluntario humano, a veces conocido en la hermandad de los físicos

como «el amigo de Wigner», por el físico Eugene Wigner que ha tratado este aspecto de la paradoja (véase Figura 18). Con un cómplice así de capaz instalado en la caja, es posible, si lo encontramos vivo al final del experimento, preguntarle qué ha sentido durante el período anterior a que se abriera la caja. No cabe duda de que responderá «nada», pese a que su cuerpo estuviera en estado de vida-y-muerte durante el tiempo del experimento, para emerger dramáticamente una vez más a la condición de vivo. Es cierto que a veces las personas se quejan de sentirse medio muertas, pero cuesta creer que los fenómenos de interferencia cuántica tengan mucho que ver con eso.

Si insistimos en adherirnos a cualquier precio a los principios cuánticos, desembocamos en el solipsismo: la conclusión de que el individuo (en este caso el lector) es lo único que realmente existe, siendo todo lo demás robots inconscientes que simplemente componen el decorado. Si el amigo de Wigner es un robot, no se puede confiar en que dé fielmente cuenta de sus percepciones, pues en realidad no siente nada. Ahora bien, esto es un gran salto, pues coloca al observador en el centro de la realidad de una manera más crucial de lo que previamente habíamos aceptado.

Para eludir el solipsismo, el propio Wigner ha propuesto que la teoría cuántica no puede ser correcta en todas las circunstancias; que cuando participa la percepción consciente del observador la teoría se desmorona y la descripción del mundo como conjunto de ondas superpuestas queda invalidada. El solipsismo ha tenido sus

partidarios durante siglos, pero la mayor parte de la gente, incluido Wigner, lo encuentra inaceptable. En la interpretación de Wigner de la teoría cuántica, el entendimiento de los seres conscientes ocupa un papel central dentro de las leyes de la naturaleza y de la organización del universo, pues es precisamente cuando la información sobre una observación penetra en la conciencia de un observador cuando realmente la superposición de ondas cristaliza en realidad. Así pues, en un determinado sentido, ¡todo el panorama cósmico está generado por sus propios habitantes! Según la teoría de Wigner, antes de que hubiese vida inteligente el universo «realmente» no existía. Esto plantea a los seres vivos la grave responsabilidad, de hecho una responsabilidad cósmica, de mantener la existencia de todo lo demás, pues si cesara la vida, todos los demás objetos —desde la estrella remota hasta la menor partícula subatómica— ya no disfrutarían de realidad independiente, sino que caerían en el limbo de la superposición. La ganancia que reporta este pavoroso papel consiste en que el amigo de Wigner está ahora en condiciones de reducir los contenidos de la caja —incluido él mismo— a realidad, de tal modo que cuando Wigner le pregunte finalmente cómo se ha sentido en los momentos precedentes, podrá afirmar «bien», seguro de que el conocimiento que tiene es ya cien por cien real, sin depender de la ayuda de la posterior observación de su estado por Wigner para emerger corporal y mentalmente en realidad.

Como era de esperar, la idea de Wigner ha sido muy criticada. Los

científicos suelen considerar la conciencia, en el mejor de los casos, como algo poco definido (¿es consciente una cucaracha? ¿una rata? ¿un perro?...) y, en el peor de los casos, como inexistente desde el punto de vista físico. Sin embargo, debe concederse que todas nuestras observaciones y, a través de éstas, toda la ciencia se basa, en último término, en nuestra conciencia del mundo que nos rodea.

Tal como habitualmente se concibe, el mundo exterior puede actuar sobre la conciencia, pero ésta no puede de por sí actuar sobre el mundo, lo que quebranta el principio, por lo demás universal, de que toda acción da lugar a una reacción. Wigner propone reafirmar este principio también en el caso de la conciencia, de modo que ésta pueda afectar al mundo, de hecho, reduciendo la superposición a realidad.

Una objeción más seria a las ideas de Wigner se plantea si participan dos observadores en el mismo sistema de observación, pues entonces cada uno de ellos tiene el poder de cristalizarlo en realidad.

Para ilustrar el tipo de problemas que de ahí se derivan, supongamos que estudiamos de nuevo un núcleo radiactivo, cuya desintegración dispararía un contador Geiger, pero que esta vez no hay ningún observador consciente implicado de forma inmediata. Todo está dispuesto de tal modo que al cabo de un minuto, cuando la probabilidad de desintegración es del cincuenta por ciento, el experimento ha terminado y el indicador del contador Geiger queda fijo en cualquiera que sea la posición que en ese momento ocupe, es

decir, desviada si el núcleo se ha desintegrado y sin variación en el caso contrario, de tal forma que sea posible hacer su lectura en cualquier momento posterior. En lugar de haber un experimentador que mire directamente el indicador, el contador Geiger es fotografiado. Cuando al fin se revela la fotografía, el experimentador la mira, sin consultar en ningún momento el contador directamente. Según Wigner, sólo en esta última etapa del proceso aparece la realidad, puesto que la realidad debe su creación al acto consciente de la observación por parte del experimentador o de cualquier otra persona. De ahí que debamos concluir que antes del examen de la fotografía, el núcleo, el contador Geiger y la fotografía estaban los tres en situaciones esquizofrénicas consistentes en la superposición de los resultados alternativos del experimento, aun cuando el revelado de la fotografía pueda retrasarse muchos años. Ese rinconcito del universo tiene que permanecer brujuleando en la irrealidad hasta que el experimentador (o bien un espectador curioso) se digne a echar una ojeada a la fotografía.

El verdadero problema surge si se toman dos fotografías sucesivas, llamémoslas A y B, del contador Geiger al final del experimento. Puesto que el indicador queda fijado, sabemos que la imagen de A debe ser idéntica que la de B. El obstáculo aparece si también hay dos experimentadores, llamémosles Alan y Brian, y Brian ve la fotografía B antes de que Alan vea la A. Ahora bien, B fue tomada después de A, pero es examinada antes. La teoría de Wigner exige que Brian sea aquí el individuo consciente responsable de crear la

realidad, puesto que es el primero que ve su documento fotográfico.

Supongamos que Brian ve el indicador desviado y afirma que el núcleo se ha desintegrado. Naturalmente, cuando Alan ve la fotografía A, ésta presentará igualmente el indicador desviado. La dificultad es que cuando se tomó la fotografía A, todavía no existía la fotografía B, ¡de manera que la ojeada de Brian a la fotografía B causa misteriosamente que A sea idéntica a B aun cuando A fue tomada con anterioridad a B!

Parece ser que nos vemos obligados a creer en causaciones retroactivas; al mirar Brian la fotografía, quizá muchos años después, influye en la operación de la cámara durante la fotografía anterior.

Pocos físicos están dispuestos a invocar la conciencia como explicación de la transición del mundo desde la superposición fantasmal a la realidad concreta, pero la cadena de Von Neumann no tiene ningún otro final evidente. Podemos considerar sistemas cada vez mayores, actuando cada cual como una especie de observador de otro sistema, tomando nota del estado del sistema menor, hasta que el conjunto del ensamblaje abarque el universo entero. ¿Qué pasa entonces? Como vimos en el capítulo 5, de hecho el universo puede describirse como un superespacio de universos: la superposición de una infinitud de mundos superpuestos. Si nuestro mundo no es más que una proyección del superespacio, o un corte tridimensional del mismo, entonces hay que encontrar la forma de reducir este inmenso haz de mundos del superespacio a esta única

proyección. Pero como sabemos ahora, esta cristalización en realidad precisa de un sistema no—cuántico que lo observe. Cuando nos ocupamos del universo entero —de toda la creación— no hay, por definición, nada exterior que pueda observarlo. El universo se supone que es todo lo que existe y, si todo está cuantificado, incluido el espacio-tiempo, ¿qué es lo que puede colapsar el cosmos en realidad sin invocar la conciencia?

Una idea extravagante que ha disfrutado de cierta aceptación entre los físicos es la propuesta por Hugh Everett en 1957 y desarrollada por Bryce De Witt, de la Universidad de Texas. La idea básica consiste en abandonar los aspectos epistemológicos y metafísicos de la teoría cuántica y aceptar literalmente la descripción matemática. Se trata de una cuestión sutil que precisa de explicación. Cuando utilizamos las matemáticas para representar un sistema conocido, como la trayectoria de un proyectil, la marcha de una economía o bien para contar ovejas, se supone que los símbolos matemáticos sustituyen directamente las cosas que representamos (es decir, proyectiles, dinero u ovejas). Esto también sigue siendo cierto en buena parte de la física moderna y sin duda en el caso de la mecánica newtoniana. No obstante, en la interpretación convencional de la teoría cuántica, no es cierto.

Como hemos explicado en los anteriores capítulos, es necesario describir el movimiento de las partículas microscópicas mediante una onda. La onda no es en sí un objeto físico que pueda imaginarse como una sustancia ni observarse en el laboratorio; es

una onda probabilística. Además, como hemos señalado en el capítulo 6, ni siquiera podemos considerar una partícula aislada como una cosa por derecho propio, con cualidades independientes. De ahí se sigue que las matemáticas se refieren en este caso a algo absolutamente abstracto y que realmente sólo proporciona un algoritmo para calcular los resultados de las observaciones reales.

Según Bohr, las ondas de materia no son en absoluto una cosa, sino únicamente un procedimiento de cálculo. Bohr sostiene que «Es un error pensar que la tarea de la física consiste en descubrir cómo «es» la naturaleza. La física se ocupa de lo que nosotros podemos decir de la naturaleza». Y según Heisenberg, las matemáticas «ya no describen el comportamiento de las partículas elementales, sino sólo nuestro conocimiento de su comportamiento».

La propuesta de Everett y De Witt consiste en restaurar la realidad de la onda y considerarla una auténtica descripción del mundo. El precio a pagar por el ascenso de categoría es la supresión de la paradoja de la medición anteriormente descrita, puesto que no es necesario que ocurra ninguna especial reducción a una realidad en el momento de la observación: la realidad ya está ahí. Así pues, la teoría de Everett considera que las partículas atómicas existen realmente en unas condiciones concretas y bien determinadas, aunque sigan estando sometidas a las habituales incertidumbres de la mecánica cuántica. Esto supone un marcado contraste con la interpretación de la escuela de Copenhague descrita en el capítulo 6.

A la vista del tratamiento presentado en el anterior capítulo sobre las dificultades que conlleva la visión de sentido común de la realidad, podría parecer extraño que un simple cambio de perspectiva respecto a las matemáticas restaurase la realidad. El caso es que la imagen de la realidad de Everett está tan lejos de la de sentido común como la imagen de la escuela de Copenhague. La capacidad de las ondas para superponerse y de las condiciones cuánticas para reconstituirse a partir de una superposición de otros estados es un elemento ineludible de la física microscópica. En la teoría de Everett esto se acepta serenamente y se lleva a sus conclusiones lógicas: si la superposición a modo de onda es real, también lo es el superespacio. En lugar de suponer que todos los demás mundos del superespacio son meras realidades potenciales —mundos fallidos— que se codean con el mundo que nosotros percibimos pero no adquieren su propia concreción, Everett propone que esos otros universos existen realmente y son en cada punto tan reales como el que nosotros habitamos. De hecho, como veremos, es equivocado pensar que nosotros habitamos un mundo especial del superespacio: en la teoría de Everett, el propio superespacio es nuestra morada.

La teoría de Everett se denomina a veces, por razones obvias, la interpretación en muchos universos de la teoría cuántica y tiene algunas consecuencias notables, una de las cuales queda bien ejemplificada en el polarizador y el fotón. Como se ha explicado en el capítulo anterior, si el polarizador se sitúa en un determinado

ángulo, el fotón o bien pasará —en cuyo caso emergerá con exactamente la polarización del ángulo del polarizador— o bien quedará bloqueado. En términos de ondas, el estado del fotón antes de alcanzar el polarizador es una superposición de dos mundos, uno en que la polarización del fotón es paralela a la del polarizador y otro en el que es perpendicular. Ahora bien, la interpretación de la escuela de Copenhague dice que, al alcanzar el polarizador, sólo uno de estos dos mundos se proyecta fuera del superespacio como verdadera realidad.

En la teoría de los muchos universos, ambos mundos son reales, de manera que el hecho de disparar un fotón hacia el polarizador divide literalmente el universo en dos: uno en el que el fotón pasa y otro en el que queda bloqueado.

En la exposición anterior, se ha elegido un ejemplo especialmente simple que sólo admite dos alternativas. No obstante, en general, habría muchos mundos alternativos posibles como resultado de un experimento, e incluso podría haber una infinidad de ellos. De ahí se deduce que, según esta teoría, el mundo está constantemente escindiéndose en incontables nuevas copias de sí mismo. En palabras de De Witt: «Debemos imaginar que nuestro universo está constantemente dividiéndose en un inmenso número de ramas.” Cada proceso subatómico tiene la facultad de multiplicar el mundo, a lo mejor un enorme número de veces. De Witt explica: «Cada transición cuántica que tiene lugar en cada estrella, en cada galaxia, en cada remoto rincón del universo está dividiendo nuestro

mundo local en miríadas de copias de sí mismo. ¡Es esquizofrenia con ganas!". Además de esta incesante repetición, nuestros propios cuerpos forman parte del mundo y también se dividen una vez tras otra. No sólo nuestro cuerpo, sino nuestro cerebro y, cabe presumir, nuestra conciencia se multiplica repetidamente, convirtiéndose cada copia en un ser humano pensante y sintiente que habita en otro universo muy parecido al que vemos a nuestro alrededor.

La idea de que el propio cuerpo y la propia conciencia se dividan en miles de millones de copias es, como mínimo, sorprendente, pero los partidarios de esta teoría han argumentado que el proceso de escisión es absolutamente inobservable, porque las réplicas de conciencias no pueden comunicarse de ninguna manera entre sí. De hecho, los distintos mundos del superespacio están todos absolutamente desconectados en lo que respecta a comunicación. A ningún individuo le es posible dejar un mundo y visitar su copia en otro; ni siquiera podemos echar una ojeada a cómo es la vida en todos esos otros mundos.

Si no podemos ver esos otros mundos ni visitarlos, ¿dónde están? Los autores de ciencia-ficción han inventado muchas veces mundos «paralelos» que supuestamente coexisten «al lado» del nuestro o que de alguna manera se interpenetran con el nuestro. En un determinado sentido, mucha gente tiene una imagen del cielo en forma de mundo alternativo que coexiste con el nuestro, pero que no ocupa el mismo tiempo ni espacio físico. A veces se ha intentado explicar los fantasmas como supuestas imágenes de algún otro

mundo momentáneamente vislumbradas por personas dotadas de especiales capacidades sensoriales. Por lo que se refiere al científico, nuestro mundo se percibe como cuatridimensional (tres dimensiones en el espacio y la cuarta en el tiempo), pero con frecuencia se injertan otras dimensiones, sea por conveniencia matemática o bien, como ocurre en el caso del superespacio de Everett, como modelo de la realidad. Desde el punto de vista matemático, estas extra dimensiones son fáciles de manejar, aunque pueda costar visualizarlas físicamente. Irónicamente, en lugar de paralela a nuestro espacio, toda extra dimensión de que no somos conscientes se describe matemáticamente como perpendicular a las nuestras.

Para entender esta cuestión, imaginemos las sensaciones de una criatura absolutamente plana —llamémosle una hojuela— que vive en una superficie bidimensional, como es la de una mesa o de un balón.

Para la hojuela todo su mundo consiste en esta superficie bidimensional y no puede percibir arriba ni abajo. En el mundo de la hojuela, las cosas tienen una extensión que se describe con la longitud y el área, pero no existe la idea de volumen. Con nuestra percepción superior, nosotros vemos que la hojuela está en realidad incrustada en un espacio mayor que se extiende perpendicularmente a ella y a su superficie. Nosotros vemos que hay un dentro y un fuera del balón, idea que se puede enseñar a comprender y describir a la hojuela mediante las matemáticas, pero

que tendrá dificultades en visualizar en términos de sus conceptos físicos habituales.

De manera similar, si existieran en el espacio otras direcciones perpendiculares a la altura, la longitud y la anchura, las limitaciones de nuestra percepción nos impedirían el conocimiento directo de estas dimensiones, aunque pudiéramos inferir su existencia utilizando las matemáticas y la experimentación. En el modelo del mundo de Everett, el espacio es un mero sub espacio tridimensional del superespacio, que en realidad contiene infinitas direcciones perpendiculares, lo cual es una idea completamente imposible de visualizar, pero con un sólido fundamento matemático.

Aunque no podamos percibir todos esos otros mundos, su existencia conduce de manera harto natural a las propiedades estadísticas de los sistemas cuánticos que, en la interpretación habitual de la teoría cuántica, surge como un elemento inherente a la naturaleza que carece de explicación. Como hemos explicado, normalmente utilizamos los conceptos estadísticos y de probabilidades cuando carecemos de información pormenorizada sobre un sistema.

Por ejemplo, cuando lanzamos una moneda, puesto que no conocemos al detalle la velocidad de rotación, la altura del lanzamiento, etc., sólo podemos decir que hay el cincuenta por ciento de probabilidades de que salga cara o cruz. Por tanto, la incertidumbre es realmente la exacta medida de nuestra ignorancia. En la teoría cuántica, la incertidumbre es absoluta, pues ni siquiera

el más detallado conocimiento del estado de un núcleo atómico radiactivo, pongamos, consigue predecir con exactitud cuándo se desintegrará. La teoría de los muchos universos aporta una nueva perspectiva a esta indeterminación fundamental. La información que habría conducido a la total predictibilidad queda, por así decirlo, oculta para nosotros en los otros mundos a que no tenemos acceso.

Por tanto, el superespacio en su totalidad es completamente determinista; el elemento aleatorio procede de que nosotros solamente tenemos acceso a una diminuta porción del todo. Entendiendo el universo real como todo el superespacio, se ve que Dios, a fin de cuentas, no juega a los dados. El juego del azar no procede de la naturaleza, sino de nuestra percepción de la naturaleza. Nuestra conciencia trenza una ruta aleatoria a lo largo de las trayectorias constantemente ramificadas del cosmos, como si fuéramos nosotros, y no Dios, quienes jugásemos a los dados.

Muchos de los otros mundos son muy parecidos al nuestro, diferenciándose tan sólo en el estado de unos cuantos átomos. Estos mundos contienen individuos conscientes virtualmente indiferenciables de nosotros en cuerpo y entendimiento, que poseen existencias casi paralelas a las nuestras. De hecho, estos duplicados casi exactos comparten con nosotros precursores comunes, pues en el pasado las ramas convergen y se fusionan. De modo que lo que comienza en el nacimiento como una conciencia se multiplica innumerables millones de veces hasta la muerte.

No todos los demás mundos están habitados por otros nosotros, sin embargo. En algunos, las trayectorias ramificadas conducen a la muerte prematura. En otros, nunca habrá ningún nacimiento, mientras que también existen aquellos que pueden haber quedado tan desviados del mundo de nuestra experiencia que allí no es posible ninguna clase de vida. Este tema lo completaremos en el siguiente capítulo.

¿Qué podemos decir sobre esas otras regiones del superespacio de las que no somos más que una diminuta muestra? ¿Qué ocurre en todos esos otros mundos? En el capítulo 1 decidimos que ciertos procesos, como el lanzamiento de una bola, son relativamente poco sensibles a los pequeños cambios de las condiciones iniciales, mientras que otros, como el movimiento de un conjunto de bolas de billar, pueden verse drásticamente afectados por la menor variación de la velocidad o del ángulo de la bola que impele el taco. En el superespacio, la indeterminación cuántica dará lugar a que las bolas, y todo lo demás, sigan trayectorias ligeramente inciertas. Cada uno de los mundos del superespacio es una realidad distinta con su propia trayectoria de la bola, de manera que cada punto representa un universo genuino, ligeramente distinto de los inmediatos. En muchos casos, cuando las pequeñas perturbaciones no crean diferencias cualitativas, los mundos serán casi indistinguibles, pero cuando el proceso en cuestión está delicadamente equilibrado en las escalas del azar, los mundos alternativos se diferencian de modo notable.

Un ejemplo importante de cómo influyen drásticamente los fenómenos cuánticos en el mundo de nuestra experiencia es el efecto de la radiación sobre el material genético. La composición de toda la materia viviente de la Tierra está controlada por la larga cadena molecular denominada ADN, que consiste en una doble hélice de átomos ordenados de manera compleja. Si el modelo ordenador se altera, el código genético cambia y el ADN no se reproduce de la forma adecuada. Si el ADN alterado es de las células del huevo o del esperma, la descendencia sufrirá una mutación. El ADN puede dañarse de muchos modos, pero una amenaza universal es la radiación cósmica: partículas subatómicas con mucha energía que acribillan la Tierra desde el espacio exterior. El impacto de cualquier partícula cargada sobre la molécula de ADN tiene como resultado una mutación del código genético.

Las mutaciones son vitales para la evolución, porque proporcionan una diversidad de formas alternativas entre las que la naturaleza selecciona o destruye según la eficiencia de cada una. Pero, en lo tocante a una persona individual, la mutación puede ser un desastre. Está claro que la presencia de una mutación es una cuestión enormemente delicada, pues depende de que una partícula subatómica colisione con determinada parte de una molécula. La partícula bien puede haber sido producida como efecto secundario, en la alta atmósfera, cuando una partícula primaria se estrelló contra los átomos del aire. De ahí se sigue que incluso un simple cambio infinitesimal en el ángulo de salida de la partícula bastaría

para que no acertara con la exacta molécula situada millas abajo y que la mutación no se produjese. De manera que vemos que los accidentes genéticos son enormemente inestables con respecto a los pequeños cambios subatómicos y que los mundos vecinos del superespacio podrían ser muy distintos por lo que se refiere a una persona mutante. Además, si la mutación engendra alguna cualidad superior —tal como mayor capacidad literaria, militar o científica—, el mundo habitado por el mutante puede ser drásticamente modificado por su influencia. Recíprocamente, figuras de vital importancia histórica habrán sufrido en los mundos vecinos mutaciones deletéreas y no sobresaldrán.

Retrocediendo mucho en el tiempo, cambios muy pequeños pueden haber dado lugar a grandes diferencias actuales. Por ejemplo, en un mundo donde le hubiera ocurrido un accidente a uno de nuestros antepasados hace diez mil años, todos sus descendientes actualmente vivos, que pueden sumar miles de personas, no existirían. Tomando otro ejemplo, cambios inmensamente pequeños en el movimiento de los planetas o de los residuos rocosos que hay entre ellos pueden alterar la ruta de un asteroide próximo e inofensivo dando lugar a un horroroso cataclismo.

Adoptando la visión más amplia posible del superespacio, da la sensación de que toda situación a que se pueda llegar siguiendo cualquier trayectoria por retorcida que sea, ocurrirá a la postre en alguno de esos otros mundos. Cada átomo tiene a su disposición, por obra del azar cuántico, miles de millones de trayectorias, y en la

teoría de los muchos mundos se acepta que todas, y por tanto cualquier ordenación atómica, ocurrirá en alguna parte. Habrá mundos que no tengan Tierra, ni Sol, ni siquiera Vía Láctea. Otros pueden ser tan distintos del nuestro que no existan estrellas ni galaxias de ninguna clase. Algunos universos serán completamente oscuros y caóticos, con agujeros negros que se tragarán al azar el material desperdigado, mientras que otros estarán quemados por las radiaciones.

Existirán universos que en apariencia tengan el mismo aspecto que el nuestro, pero con distintas estrellas y planetas. Incluso aquellos que, en esencia, cuenten con la misma ordenación astronómica contendrán distintas formas de vida: en muchos, no habrá vida sobre la Tierra, pero en otros la vida habrá prosperado a mayor velocidad y existirán sociedades utópicas. Y aún otros habrán sufrido la total destrucción bélica, mientras que en algunos toda la Vía Láctea estará colonizada por extraterrestres, incluida la Tierra. De hecho, virtualmente, las alternativas posibles no tienen ningún límite.

Esta vasta multiplicidad de realidades plantea una intrigante pregunta: ¿por qué nos hallamos nosotros viviendo en «este» universo concreto y no en cualquier otro de las miríadas que hay de ellos?

¿Tiene éste algo de especial o bien nuestra presencia aquí se debe al puro azar? Por supuesto, en la teoría de Everett, también vivimos en otros muchos universos, si bien sólo una pequeña fracción de ellos

está habitada, pues hay muchos que no permiten la vida. ¿Cuántas de las características que nos rodean son necesarias para que exista la vida? Estos problemas se abordarán en el siguiente capítulo.

Capítulo VIII
El principio antrópico

¿Por qué está este mundo organizado así? El universo que habitamos es un lugar muy especial, dotado de una estructura muy elaborada y de una actividad compleja.

¿Tiene algo de particular la ordenación de la materia y la energía que realmente observamos en comparación con la que hubiera podido tener? Dicho en otras palabras, entre la infinitud de mundos alternativos que nos rodean en el superespacio, ¿por qué nuestras mentes conscientes perciben este mundo concreto en lugar de cualquier otro?

Las cuestiones de selección y probabilidad siempre deben abordarse con cuidado. Si se baraja un mazo de cartas y se reparte, el juego que recibe cada jugador es a priori sobrecogedoramente improbable; es decir, si se intenta predecir el juego antes de barajar, las posibilidades de acertar son enormemente pequeñas. Sin embargo, claro está, no consideramos que cada reparto de cartas constituya un milagro. Por regla general, todo conjunto de cartas se parece mucho a otro y con frecuencia nada tiene de particular cualquier selección concreta hecha al azar. No obstante, si recibimos un palo completo deberemos considerarlo una ocurrencia enormemente rara, pues la serie del palo tiene una significación superior a la de cualquier otra secuencia menos estructurada de cartas. Del mismo modo, ganar una rifa suele tenerse por un suceso afortunado,

porque el número ganador, en nada más notable que cualquier otro, tiene una significación especial.

En el tratamiento religioso tradicional de la cuestión del orden cósmico, suele suponerse que el mundo fue hecho por Dios con la estructura concreta que conocemos, precisamente con objeto de colonizarlo con seres humanos. La Biblia presenta una descripción directa de cómo se llevó a cabo la obra: en primer lugar, se puso la luz, luego el firmamento en medio de las aguas; las aguas se dividieron entre las que están bajo el firmamento y las que están sobre el firmamento, y las situadas bajo el firmamento se congregaron en un lugar; apareció la tierra seca y, por último, la Tierra fue dotada de plantas y animales. De este modo, Dios creó las condiciones necesarias para el sostenimiento de la vida humana.

Un examen de la vida sobre la Tierra pone de manifiesto cuán delicadamente equilibrada está nuestra existencia en la balanza del azar. Hay una larga lista de prerrequisitos indispensables para la supervivencia de nuestra especie. En primer lugar, debe haber un abundante suministro de los productos químicos que componen la materia bruta de nuestro cuerpo: carbono, hidrógeno, oxígeno, así como algunas pequeñas pero vitales cantidades de elementos más pesados como el calcio y el fósforo. En segundo lugar, no debe haber peligro de contaminación por obra de otros productos químicos venenosos: no nos convendría una atmósfera de metano ni de amoníaco como la que hay en otros muchos planetas. En tercer lugar, precisamos un abanico de temperaturas bastante estrecho,

de modo que la química de nuestro cuerpo pueda funcionar al ritmo adecuado. Sin un vestuario especial, es dudoso que los seres humanos puedan sobrevivir mucho tiempo fuera de las temperaturas comprendidas entre los 5 y los 40 grados centígrados. En cuarto lugar, se necesita provisión de energía libre, que en nuestro caso proporciona el Sol. Es importante que esta provisión de energía se mantenga estable y no sufra grandes fluctuaciones, lo que no sólo exige que el Sol continúe ardiendo con extraordinaria uniformidad, sino también que la órbita de la Tierra sea casi circular para evitar acercamientos y alejamientos de la superficie solar. Un quinto requisito es que la gravedad de la Tierra sea lo bastante fuerte para evitar que la atmósfera se disperse en el espacio, pero lo bastante débil para que podamos movernos con facilidad y, en ocasiones, caernos sin lesiones fatales.

Un examen más detallado muestra que la Tierra está dotada de «servicios» aún más asombrosos. Sin la capa de ozono situada sobre la atmósfera, los mortales rayos ultravioletas del sol nos destruirían y, de faltar el campo magnético, las partículas subatómicas cósmicas diluviarían sobre la superficie terrestre. Teniendo en cuenta que el universo está lleno de violencia y cataclismos, nuestro pequeño rincón del cosmos disfruta de una apacible tranquilidad. A quienes creen que Dios hizo el mundo para la humanidad, todas estas condiciones de ningún modo deben parecerles casuales, sino el reflejo de un medio ambiente cuidadosamente preparado para que los humanos puedan vivir cómodamente, un ecosistema

preestablecido al que la vida se ajusta de manera natural e inevitable: una especie de mundo hecho a nuestra medida.

El significado de estas «coincidencias» se alteró espectacularmente al descubrirse que la vida de la Tierra no es estática, sino que está en constante evolución. Entonces fue posible, a partir de la teoría evolucionista de Darwin, dar la vuelta al problema y preguntarse, no por qué está la Tierra tan bien conformada para la vida, sino por qué la vida se adapta tan bien a la Tierra. La mutación y la selección natural aportaron la respuesta: los organismos que por cambios aleatorios resultan ser más acordes con las condiciones prevalecientes tienen ventajas selectivas en las contingencias de la supervivencia, y tenderán a proliferar a expensas de sus vecinos peor adaptados. Por ejemplo, de haber sido la gravedad mayor, eso hubiera favorecido el desarrollo de las criaturas parásitas de menor tamaño dotadas de huesos más fuertes. Una temperatura ambiente más alta hubiera fomentado el desarrollo de aletas refrescantes y de otros medios de controlar el calor. Por tanto, en muchos sentidos, después de todo, la Tierra no tiene nada de especial, en lo tocante a la vida. De haber sido las condiciones distintas, también nosotros seríamos distintos.

Sin embargo, no es posible sostener que hubiéramos evolucionado para adaptarnos a cualesquiera circunstancias, pues existen ciertos límites y requisitos absolutos sin los cuales la vida es imposible.

Por ejemplo, es dudoso que pueda haber vida en un planeta sin atmósfera (como es el caso de la Luna) o bien con una temperatura

superior a la de la ebullición del agua.

También cuesta imaginar la vida alrededor de un sol de costumbres excéntricas: conocemos muchas estrellas que fulguran de forma impredecible y que incluso explotan.

Al estimar que el Sol es una estrella típica, apreciamos la vida sobre la Tierra desde una perspectiva más cósmica. Hay estrellas de todas clases de tamaños, masas y temperaturas, y aunque nuestro Sol es un enano entre las estrellas, no se desconocen otras de su mismo tamaño. Hay tantos miles de millones de estrellas (quizás infinitas) que aun cuando la vida sea un accidente increíblemente raro es indudable que ocurrirá en último término en puntos sueltos del universo. La vida que ha surgido en la Tierra es una simple consecuencia del hecho de que es más probable que el accidente ocurra en un planeta cuyas condiciones son óptimas. De ahí podemos sacar la conclusión de que nuestra localización en el cosmos no es aleatoria, sino que está seleccionada por las condiciones necesarias para que estemos aquí. Esta importante conclusión, que muchas veces se da por supuesta, puede ser vital para nuestra visión de nosotros mismos y de nuestro lugar dentro del gran orden.

Si aplicamos a nuestra localización en el superespacio el mismo razonamiento que a nuestra localización en el espacio, podemos concluir que muchísimos otros rasgos del mundo deben ser consecuencia de esta selección biológica. Como sólo un magro subconjunto de todos los mundos posibles puede sostener la vida,

la mayor parte del superespacio estará deshabitada. El mundo en que vivimos es, inevitablemente, el mundo que vivimos.

Este tipo de razonamiento se conoce, con cierta grandiosidad, como el principio «antrópico». Su significación depende de cuál sea la interpretación de la teoría cuántica que adoptemos. Según la interpretación convencional de la escuela de Copenhague, esbozada en anteriores capítulos, sólo existe «realmente» nuestro mundo, siendo las demás regiones del superespacio «mundos» fallidos: alternativas potenciales que la naturaleza, por capricho casual, ha rechazado. En cuyo caso no podemos afirmar que nuestra propia existencia explique la estructura y la organización del universo (al menos en la medida en que afecta a la supervivencia de la vida inteligente) porque eso supondría un razonamiento circular: estamos aquí porque las condiciones son las adecuadas y las condiciones son las adecuadas porque estamos aquí. Todo lo que puede aportar el principio antrópico es un comentario sobre lo afortunado que resulta el que estemos aquí. Si una cantidad inmensamente mayor de mundos alternativos no puede mantener la vida inteligente, entonces pasarán inadvertidos, sin que ningún cosmólogo se extrañe de su grado de improbabilidad. Así que deberíamos considerarnos inmensamente afortunados por el hecho de estar vivos, y deberíamos ver nuestra existencia como un accidente enormemente improbable.

Por otra parte, en la interpretación de la teoría cuántica de Everett, la de los muchos universos, todos los demás mundos del

superespacio son reales y todos tienen el mismo grado de existencia. Si la vida es algo muy delicado, entonces la mayor parte de estos mundos están desprovistos de observadores. Sólo el nuestro y los muy similares tendrán espectadores. En tal caso, nosotros, mediante nuestra presencia, hemos seleccionado el tipo de mundo en que habitamos entre una infinita variedad de posibilidades. El que esto se considere o no una verdadera explicación del mundo depende del sentido que demos a la palabra.

Si entendemos por explicación la identificación de la causa de algo, entonces, dada la forma habitual de entender la causalidad, no podemos decir que el universo esté verdaderamente causado por la vida, puesto que la vida es posterior.

Pero si «explicación» significa un marco de referencia para comprender, entonces la teoría de los muchos universos aporta una explicación de por qué las muchas cosas que nos rodean son como son. Exactamente igual que podemos explicar por qué vivimos en un planeta próximo a una estrella estable, señalando que sólo en semejante localización puede formarse la vida, así también podemos explicar muchos de los rasgos más generales del universo mediante este proceso de selección antrópica. En resumen, las dos interpretaciones de la teoría cuántica se remiten bien al azar o bien a la elección para explicar el mundo.

¿Hasta qué punto exactamente es delicado el equilibrio de la vida en la balanza del azar y con qué amplitud pueden variar las características de nuestro universo sin que éste deje de existir?

Sobre todo, ¿hasta qué punto son distintos los demás mundos del superespacio? ¿Sería posible que casi todos ellos, pese a todas las variaciones disponibles, acabaran por parecer muy similares al nuestro?

Para responder a la primera de estas preguntas es necesario determinar cuál es el tamaño de la fracción habitable de todos los mundos posibles. Desde un principio, debemos volver a subrayar que la naturaleza del mundo depende de dos cosas: las leyes de la física y las condiciones iniciales. En el capítulo 1 se explicó que la forma de la trayectoria que sigue una bola lanzada al aire está determinada (despreciando los efectos cuánticos) tanto por las leyes del movimiento newtoniano como por el ángulo y la velocidad de lanzamiento. Puesto que las leyes de la física se consideran absolutas, debemos esperar que también se cumplan en los demás mundos del superespacio. Por el contrario, las condiciones iniciales que acompañan a todo proceso concreto no serán las mismas en los demás sitios, puesto que en eso precisamente consiste la diferencia entre los distintos mundos.

Dos problemas plantean dividir las influencias en condiciones iniciales y leyes físicas. El primero es que en cosmología, donde el objeto de estudio es todo el universo, no tiene mucho sentido hablar de una ley física. Una ley se caracteriza por ser una propiedad que se aplica repetida e infaliblemente a un gran número de sistemas idénticos, pero como sólo hay un universo accesible a nuestra observación no podemos comprobar si se comporta (como un todo)

de acuerdo a alguna ley. Por ejemplo, ¿es una ley o tan sólo un rasgo accidental que la temperatura del espacio (muy alejado de las estrellas) sea alrededor de tres grados absolutos? ¿Pudiera ser otra su temperatura? Sólo si pudiéramos ver los otros mundos del superespacio y comprobar que estos rasgos, supuestamente similares a las leyes, se manifiestan también allí, se podría establecer alguna ley cosmológica. El segundo problema consiste en que, lo que para una generación es una ley fundamental de la física puede convertirse en la siguiente generación, con un conocimiento científico superior, en un simple caso especial de alguna ley aún más fundamental. Un ejemplo conocido se refiere a la noche y el día. Para los antiguos era una ley de la naturaleza, de la misma categoría que las demás leyes, que el día tiene infaliblemente veinticuatro horas de duración.

Gracias a nuestros superiores conocimientos de mecánica, sabemos ahora que nada hay de fundamental en el período de veinticuatro horas y que la duración del día puede variar y de hecho varía. Las variaciones son muy ligeras (aunque fáciles de medir con los modernos relojes atómicos) en la duración de una vida humana, pero a lo largo de las escalas de tiempo geológicas la duración del día ha aumentado en varias horas. Cuando se trata de pensar en otros mundos del superespacio, tenemos que decidir qué rasgos de nuestro mundo tienen posibilidades de variar, es decir, cuáles son los rasgos incidentales, como la duración del día terráqueo, y cuáles son los verdaderamente básicos. Como no sabemos cuáles de

nuestras leyes más generales son únicamente casos especiales, la estrategia más segura consiste en, primero, tener en cuenta las variaciones de las cosas que sabemos que son incidentales y, luego, conceder que las leyes actualmente aceptadas pueden variar, teniendo presente la naturaleza especulativa de nuestro análisis.

El tipo de pregunta a la que nos gustaría contestar es si podríamos vivir en un universo donde la temperatura del espacio fuera de trescientos en lugar de ser de tres grados. Para responder a semejante pregunta es menester tener una idea concreta de qué entendemos por «nosotros». Si «nosotros» significa vida inteligente con la forma que se encuentra en la Tierra, la respuesta es probablemente no: haría demasiado calor para que la vida terrestre pudiera desarrollarse en ninguna parte del universo.

Por otra parte, puede haber formas de vida absolutamente distintas de las bioformas terrestres, tal vez basadas en procesos completamente distintos, que podrían sobrevivir e incluso florecer en condiciones enormemente distintas de las que reinan en la Tierra. La vida terráquea se basa en el carbono, que tiene la importante propiedad química de formar cadenas con sus átomos y con otros átomos, como el hidrógeno y el oxígeno, según una enorme variedad de formas. La clave de la vida es la complejidad, pues sin un enorme número de variaciones posibles entre los organismos vivos, no habría evolución.

La vida debe ser capaz de adaptarse en un número casi ilimitado de formas a las condiciones prevalecientes y, como ya hemos explicado,

esto acontece mediante ocasionales errores aleatorios en la estructura química de un individuo. Luego de un gran número de errores inútiles, la especie sufre una pequeña variación que dota a los organismos individuales con algunos rasgos que se adaptan mejor al medio ambiente del momento. De este modo, a lo largo de miles de millones de pasos, se ha desarrollado la inteligencia sobre la Tierra.

La necesidad de una complejidad suficiente limita en gran medida los elementos químicos disponibles para servir de base a la vida: quizás el carbono sea el único, aunque a veces se ha propuesto como posibles la silicona y el estaño.

El problema es que no existe ninguna definición auténtica de la vida. Los sistemas vivos son ejemplos de materia y energía organizadas en niveles de extrema complejidad, pero no existe ninguna clase de frontera entre lo vivo y lo no-vivo. Los cristales, por ejemplo, son estructuras muy organizadas capaces de reproducirse, pero no los consideramos vivos.

Las estrellas son sistemas con una organización compleja y elaborada, pero normalmente no se las considera vivas. Tal vez nuestra visión de la vida sea demasiado estrecha: puede haber sistemas complejos en otras regiones del universo que no tengan el menor parecido con los organismos vivos presentes en la Tierra y que, sin embargo, sean en todos los aspectos tan vivos como nosotros. Una de las especulaciones sobre estas formas de vida extravagantes la hizo el astrónomo Fred Hoyle en su novela de

ciencia-ficción The Black Cloud (La nube negra). El sujeto de la conjetura de Hoyle son las grandes nubes de gases, sobre todo de hidrógeno, que vagabundean por el espacio interestelar. Las nubes de gases no se parecen en nada a las nubes de la Tierra y, desde el punto de vista de las normas terrestres, son demasiado tenues, pues sólo contienen unos mil átomos por centímetro cúbico, que es una millonésima de billonésima de la densidad del aire y que, por tanto, se considera vacío en el laboratorio. Sin embargo, en el vacío casi perfecto del espacio, las nubes son cuerpos muy sustanciales y dispersan una gran cantidad de luz.

En la novela, Hoyle sostiene que algunas de estas nubes en realidad tienen vida, en el sentido de que tienen motivaciones y controlan sus movimientos lo mismo que una ameba; poseen una compleja organización interna, incluidas capacidades intelectuales muy superiores a las humanas.

Todas las formas de vida química son esencialmente de naturaleza electromagnética; es decir, las fuerzas que controlan los procesos químicos de nuestros cuerpos son fuerzas eléctricas y magnéticas que actúan entre los átomos. Pero el electromagnetismo sólo es una de las cuatro fuerzas conocidas de la naturaleza. Existen, además, la gravedad y dos fuerzas nucleares, conocidas como la fuerte y la débil. Es importante no excluir la posibilidad de una vida basada en estas otras fuerzas en cualquier valoración general de las condiciones necesarias para que surja vida. No obstante, al menos desde una perspectiva superficial, las otras tres fuerzas no parecen

ser un fundamento realista para la vida. La gravedad es tan débil que sólo las masas astronómicas despliegan fuerzas significativas.

Una galaxia o, en el mejor de los casos, un conglomerado de estrellas parece ser el único tipo de sistema organizado por la gravedad que conocemos. ¿Puede, en algún sentido, estar viva una galaxia? Cuesta reconocer que tal pueda ser el caso. Al margen de todo lo demás, la luz, que es lo más rápido, necesita decenas de millares de años para cruzar una galaxia, lo que quiere decir que, según la teoría de la relatividad, la galaxia solamente puede desplegar formas de comportamiento integrado a esa escala temporal. Dicho de otra manera, el tiempo que tarda en «pensar» la Vía Láctea es de unos 100.000 años, de modo que cualquier actividad organizada ha de ser aún más lenta, lo que desde cualquier punto de vista resulta de una gran indolencia.

Las fuerzas nucleares también tienen sus problemas. Los núcleos atómicos son cuerpos compuestos ligados por la fuerza fuerte, de modo que a primera vista parecen moléculas en que los átomos están unidos por fuerzas electromagnéticas. El parecido sólo es leve, empero. Los núcleos constan de dos tipos de partículas: unas llamadas protones, que tienen carga eléctrica, y otras llamadas neutrones, que no tienen carga eléctrica. Ambos tipos experimentan una fuerte atracción nuclear que las mantiene apretadas. Un núcleo pesado, como el de los átomos de uranio, tiene unas doscientas partículas cohesionadas del modo descrito. La razón de que la vida nuclear parezca imposible radica en el equilibrio de fuerzas del

interior del núcleo. La fuerza nuclear fuerte trata de unir las partículas, pero la fuerza eléctrica de los protones constituye una influencia contrarrestante y desorganizante, puesto que cada protón repele eléctricamente a todos los demás al mismo tiempo que los atrae mediante la fuerza nuclear. Aunque la atracción nuclear es mucho más fuerte que la repulsión eléctrica, tiene un campo de acción muy corto y se reduce prácticamente a nada en cuanto las partículas se separan más de una diez billonésima de centímetro. Esto significa que el protón o neutrón sólo atrae a sus vecinos más próximos, mientras que la repulsión entre los protones actúa sobre todos los protones del núcleo, puesto que su acción sólo disminuye gradualmente con la distancia. La disparidad de ámbitos de acción favorece, pues, a la repulsión eléctrica sobre la atracción nuclear en los núcleos que contienen muchos protones.

Si la repulsión eléctrica total crece hasta ser lo bastante fuerte, puede imponerse a la fuerza aglutinante de la atracción nuclear, y el núcleo explotará. Para ayudar a que las fuerzas se mantengan en una situación de equilibrio, un núcleo pesado, que contiene muchos protones, cuenta con la ayuda de los neutrones, que pueden colaborar al proceso aglutinante sin hacerlo a la repulsión eléctrica, dado que son eléctricamente neutros. Por eso los núcleos ligeros suelen contener el mismo número de protones y de neutrones (por ejemplo, el oxígeno contiene ocho de cada clase), pero el uranio, el elemento más pesado que se encuentra en estado natural en la Tierra, tiene noventa y dos protones y hasta ciento cincuenta

neutrones. Se conocen núcleos con aún mayor número de protones pero, al igual que el uranio, son radiactivos y se desintegran espontáneamente. Sin duda, hay un límite para el número de neutrones que pueden resolverle al núcleo este tipo de problemas, y el origen de esta nueva inestabilidad tiene relación con el otro tipo de fuerza nuclear, la llamada fuerza débil.

La fuerza débil es mucho más débil que el electromagnetismo y su campo de acción es tan pequeño que nunca se ha medido como extensión finita. No juega ningún papel en mantener unidas las partículas; su actividad parece reducirse, por el contrario, a hacer que las partículas subatómicas se desperdiguen o desintegren. El ejemplo más espectacular lo constituye, de hecho, el neutrón. Si un neutrón se libera de un núcleo, al cabo de unos quince minutos explota convirtiéndose en un protón, un electrón y otro tipo de partícula denominada neutrino. Esta rápida defunción se evita, dentro de los confines del núcleo, gracias a un principio cuántico fundamental denominado principio de exclusión de Pauli, del que ya hemos hablado en el capítulo 4, que dice que como todos los protones son idénticos, ningún protón puede (dicho sin rigor) ocupar el mismo estado cuántico.

Es decir, las ondas de dos protones no pueden superponerse demasiado, lo que en términos físicos significa que no pueden acercarse demasiado. Por eso, si un neutrón intenta descomponerse en protón, no habrá ningún sitio adonde pueda ir el protón al estar previamente ocupados todos los emplazamientos disponibles del

núcleo. En consecuencia, se impedirá la desintegración.

La estructura del núcleo es similar en cierto sentido a la del átomo: los electrones del átomo están confinados a determinados niveles energéticos y tanto los protones como los neutrones están también confinados a niveles energéticos dentro del núcleo. Cuando los niveles inferiores están ocupados, una partícula adicional sólo puede acomodarse en el núcleo ocupando uno de los niveles energéticos superiores. En la mayor parte de los núcleos, el neutrón no tiene la bastante energía para colocar al protón en uno de esos niveles energéticos altos, pero si un núcleo adquiere demasiados neutrones entonces este problema queda solventado. La razón es que los neutrones están también sometidos al principio de Pauli, de tal modo que los sobrantes deben encontrar localizaciones de alto nivel energético. En esta elevada posición, tendrán la suficiente energía, de tal modo que, al descomponerse, el protón quedará en una posición vacante de alta energía. De ahí se sigue que los núcleos ricos en neutrones son inestables y se convierten espontáneamente en núcleos con más protones, mientras que los núcleos ricos en protones son eléctricamente inestables y tienden a escindirse. Estos dos tipos de inestabilidad conducen a dos tipos de radiaciones, conocidas, respectivamente, como beta y alfa. Entre ambas consiguen que no pueda existir por mucho tiempo ningún núcleo con más de un par de centenares de partículas. Lo cual de ningún modo se acerca al nivel de variedad y complejidad necesario para la materia viva.

En conclusión, parece que la fuerza electromagnética es la única capaz de producir cuerpos compuestos con la bastante complejidad para que satisfagan cualquier definición razonable de vida. Llegamos, pues, a la definición de la vida como energía electromagnética organizada, probablemente mediante enlaces químicos. De ahí se sigue que adoptaremos una perspectiva conservadora y supondremos que la única clase de vida que puede existir es similar a la que se encuentra en la Tierra.

Volviendo a las condiciones de los otros mundos del superespacio y a su aptitud para la vida, en primer lugar es necesario situar el asunto en una perspectiva cósmica.

No nos interesan los otros universos donde no hay vida sobre la Tierra, aunque ocurra en otros lugares; nuestra principal preocupación es si la vida puede formarse en algún lugar de un universo alternativo particular. Según nuestra comprensión actual de la astronomía, el Sol es una estrella típica, de manera que podemos esperar, por razones de orden general, que otras estrellas similares tengan vinculados cuerpos planetarios como los del sistema solar.

Los planetas son demasiado pequeños para verlos ni siquiera con los telescopios más potentes, de modo que sólo tenemos pruebas indirectas de su existencia en otros sistemas estelares. A pesar de eso, por lo que se sabe de cómo se forman las estrellas y por la existencia de versiones en miniatura del sistema solar alrededor de Júpiter y Saturno (ambos tienen varias lunas), se considera

probable que la mayoría de las estrellas tengan planetas, algunos de ellos inevitablemente parecidos a la Tierra. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, contiene alrededor de cien mil millones de estrellas agrupadas formando una gigantesca espiral, que es una forma característica de las miles de millones de galaxias repartidas por el universo. Esto significa que la Tierra no tiene nada de especial, por lo que probablemente la vida tampoco sea un fenómeno extraordinario. Si bien no tenemos pruebas que lo demuestren, sería sorprendente que la vida no estuviera muy extendida por el universo, aunque fuese en forma bastante dispersa. El número de estrellas es tan grande que aun cuando la vida sea algo muy improbable, seguiría siendo probable que se hubiera producido en algún otro sitio. Si existen otros universos en los que no puede formarse vida, se deberá a que las condiciones globales no son las adecuadas y a que la estructura a gran escala de esos universos es muy distinta de la del nuestro. El requisito de la Tierra y del Sol constituyen una cuestión demasiado provinciana para que tenga importancia en el contexto del principio antrópico.

Dado que lo que nos importa es la estructura a gran escala del universo —la disciplina denominada cosmología—, no es menester que nos detengamos demasiado en los otros mundos del superespacio que se ramifican a partir del nuestro en este preciso momento, pues éstos se parecerán estrechamente al nuestro en sus grandes rasgos. La razón de lo dicho es que la leve recolocación o cambio de movimiento de unos átomos concretos podría ser

responsable, como ya hemos dicho, de alterar la composición genética de un futuro dirigente político, con lo que podría dar lugar o evitar una guerra mundial, pero no podría alterar la forma de toda la galaxia.

Si queremos examinar las ramas que conducen a mundos sustancialmente distintos, hemos de rastrearlos en el tronco común. Cuanto mayor sea la diferencia, más deberemos retroceder. La situación es similar a los cambios evolutivos aleatorios de los seres vivos. La vida comenzó en la Tierra hace tres o cuatro mil millones de años por medio de unos organismos simples y, a partir de esos precursores comunes, han ido gradualmente evolucionando tipos nuevos. Al aumentar la complejidad, aumentó también la variedad de formas, hasta que ahora encontramos seres vivos tan distintos como elefantes, hormigas, bacterias y árboles.

Cada generación presencia nuevos tipos de ramificaciones que se alejan de las especies centrales, pero los pasos son pequeños y el proceso es muy lento, de manera que hay muy poca diferencia en un número pequeño de generaciones. En consecuencia, para rastrear, pongamos, a los monos y los hombres, o a las ovejas y las cabras, hasta un origen común, sólo necesitamos retroceder unos cuantos millones de años. Para encontrar el tronco común de donde sale la rama del hombre y la del ratón, debemos retroceder doscientos millones de años. El doble de tiempo se necesita para encontrar el antepasado común del hombre y la rana, y hay que examinar épocas aún más primigenias antes de que converjan

animales y plantas.

Rastreando las ramificaciones del superespacio hasta un origen común es probable que encontremos el origen de la vida en la Tierra. Como explicamos en los capítulos 2 y 5, los cosmólogos modernos creen que también el universo tuvo un origen, hace alrededor de quince mil millones de años. Anteriormente se mencionó que el origen podría ser una llamada singularidad del espacio-tiempo que era indicadora del extremo final del pasado del universo físico. Si esto es cierto, la singularidad no tiene ningún pasado que podamos conocer.

En los momentos posteriores a la singularidad ocurrió el famoso Big Bang, una fase originaria en la que la expansión del universo se produjo a velocidad de explosión. Para estudiar el sino de las otras ramas del superespacio debemos retroceder a este Big Bang y ver cómo emergen los mundos alternativos a partir del remolino cósmico.

Exactamente igual como los cambios de los organismos terrestres hace tres mil millones de años han dado lugar a grandes diferencias en las ramas actuales de la evolución, los cambios aleatorios del universo primigenio pudieron crear mundos en una dirección que conduce a condiciones actuales totalmente irreconocibles para nosotros. El efecto acumulativo de incontables pequeños cambios impulsa a los mundos del superespacio a trayectorias aún más divergentes.

El cambio que en realidad nos interesa es el de la geometría del

espacio. En el capítulo 5 se introdujo la idea del superespacio como un espacio de espacios. Podemos imaginar que cada mundo tiene una geometría distinta, en unos en forma de pequeñísima distorsión, en otros con diferencias tan grandes que incluso cambia la topología. Dentro de los incontables mundos del superespacio, en alguna parte deben existir universos con todas las formas concebibles. Lo que nos importa es si el universo que observamos tiene una forma que de alguna manera sea especial o notable y, si es así, qué importancia tendría ese hecho para la existencia de vida en nuestro universo.

La noción de forma del espacio es un poco vaga y hay que encontrar el modo de formular el problema en lenguaje matemático exacto. Los matemáticos han inventado magnitudes que miden las variaciones del espacio con respecto al plano, lo que quiere decir que calibran las distorsiones —abolladuras, retorcimientos, combas— de cada lugar. Dos tipos de distorsiones se reconocen con facilidad. La primera se denomina anisotropía y es una medida de cómo la forma o geometría del espacio varía en las distintas direcciones. Por ejemplo, si a lo largo de una determinada línea de visión el universo estuviera muy estirado y se expandiera de prisa, mientras que a lo largo de una dirección perpendicular estuviera encogido y se expandiera despacio (o incluso se contrajera), deberíamos decir que el universo es muy anisótropo. El otro tipo de distorsión se denomina heterogeneidad y es una medida de cómo la geometría varía de un lugar a otro. Si el espacio contiene muchas

irregularidades y abolladuras, y si se expande a muy distintas velocidades en regiones diversas, se dice que es muy heterogéneo.

Es evidente, echando una ojeada al cielo, que el universo no es exactamente isótropo ni exactamente homogéneo. La presencia del Sol, por ejemplo, da lugar a una abolladura del espacio que representa una falta de homogeneidad local. La Vía Láctea determina una dirección especial del firmamento, lo que representa cierta anisotropía, esta vez de origen no tan local. No obstante, cuando los telescopios verdaderamente grandes se orientan hacia el espacio extra galáctico se descubren cosas notables. A una escala muy grande —es decir, a distancias superiores al tamaño de grupo galáctico— el espacio aparece muy uniforme, al mismo tiempo isótropo y homogéneo. En cualquier dirección que mire el astrónomo, ve aproximadamente el mismo número de galaxias a cualquier distancia dada y, lo que es más, estas galaxias, a cualquier distancia concreta, parecen retroceder con respecto a la Tierra a aproximadamente la misma velocidad.

Las pruebas de la homogeneidad son inferiores, pero hay una conexión geométrica entre homogeneidad e isotropía, que es ésta. A menos que la Tierra estuviera localizada exactamente en el centro del universo, lo que le otorgaría un papel privilegiado impensable a estas alturas, si el cosmos parece ser isótropo a nuestro alrededor, también debe ser isótropo en todas partes. Pero un universo que es en todas partes isótropo puede demostrarse que también es homogéneo. De donde se deduce que o bien estamos en el centro del

universo o bien el universo es homogéneo al tiempo que isótropo, al menos en las grandes escalas a que nos referimos.

Si el universo es realmente homogéneo en todas partes (y no sólo hasta donde pueden sondearlo nuestros instrumentos), eso supone que no puede haber centro ni borde, puesto que tales lugares tendrían un carácter especial, lo que contradeciría el supuesto de homogeneidad. Lo cual no significa necesariamente, como se explicó en el capítulo 5, que el universo tenga una extensión infinita, pues el espacio podría curvarse y unirse consigo mismo en una especie de hiperesfera. Esta cuestión es de topología más bien que de geometría y, probablemente, no tiene especial importancia para el principio antrópico y las condiciones necesarias para la vida, aunque sea de gran interés para cosmólogos y filósofos por otras razones.

A la vista de la ilimitada variedad de formas complejas que puede asumir el universo, en realidad es sorprendente que el universo que observamos resulte tener una estructura tan simétrica. Tan llamativa es esta uniformidad que la mayoría de los cosmólogos se niega a aceptar el hecho sin entender cómo se ha producido. Sabemos que la velocidad de la luz juega un papel central en esta teoría, en la medida en que ninguna influencia física puede propagarse con mayor rapidez que la luz. Cuando el espacio se expande, el comportamiento de la luz puede ser bastante extraño. Al igual que un corredor situado en una pista móvil tiene dificultades para mantener su avance, cuando la luz se extiende por un universo

en expansión es atraída por las galaxias que retroceden. Las galaxias se alejan unas de otras porque el espacio intermedio se dilata regularmente en todas direcciones, de modo que el espacio por el que ha de desplazarse la luz se alarga constantemente en la misma dirección en que se desplaza el rayo de luz. Un efecto de esta expansión es que también se alarga el rayo de luz, lo que aumenta su longitud de onda, dando lugar a un enrojecimiento. Este es el origen del famoso desplazamiento hacia el rojo que detectó Hubble por primera vez en la década de 1920 y que se utiliza para deducir que el universo se está expandiendo.

Conforme el rayo de luz avanza, su longitud de onda se alarga cada vez más, y se plantea el problema de si, en último término, podría alargarse de manera ilimitada, es decir, a una longitud de onda infinita. En este caso, sería incapaz de transmitir ninguna clase de información. Un análisis matemático revela las circunstancias en que esto puede ocurrir. Resulta depender de la forma exacta en que se expanda el universo a partir de la singularidad. Si se expande a una velocidad uniforme, es decir, doblando siempre el tamaño a cada intervalo idéntico de tiempo, entonces la luz puede alcanzar siempre cualquier punto remoto sin que el desplazamiento hacia el rojo acabe aniquilándola. Por otra parte, si la velocidad de expansión no es constante, pueden aparecer longitudes de onda infinitas. En concreto, si la velocidad de expansión disminuye con el tiempo, alrededor de cada punto del universo existe una especie de burbuja invisible que representaría la región del espacio visible para

el observador. La región exterior a la burbuja no se podría ver, por potentes que fuesen los instrumentos disponibles, porque ninguna luz de esa región llegaría al observador como consecuencia del infinito desplazamiento de la longitud de onda. La superficie de la burbuja, pues, desempeñaría el papel de una especie de horizonte, más allá del cual la visión sería imposible. La burbuja estaría centrada alrededor de cada observador concreto: los observadores próximos tendrían burbujas superpuestas, pero un observador situado, pongamos, en la galaxia Andrómeda (una galaxia vecina de la Vía Láctea) vería en el borde del universo visible cosas que nos son inaccesibles a nosotros, y viceversa. Cuando los observadores estuviesen muy alejados, sus burbujas no se superpondrían y se encontrarían, en todos los sentidos, en universos físicamente distintos.

Para comprobar si hay un horizonte en el universo real, podemos recurrir a las matemáticas. La teoría general de la relatividad de Einstein proporciona una ecuación que relaciona el movimiento del espacio con el contenido material del espacio, es decir, con la materia gravitatoria. Resolviendo esta ecuación para el caso simplificado de un universo uniforme se llega al resultado de que, en la medida en que la energía y la presión de la materia permanezcan positivas (no se conocen ejemplos de lo contrario), la expansión debe desacelerarse. La expansión en forma de explosión del Big Bang ha disminuido de velocidad de manera progresiva. En la actualidad es casi un millón de billones de veces más lenta que

cuando el universo tenía un segundo. La conclusión es que de hecho existe un horizonte en nuestro universo.

La burbuja no permanece estática —su superficie se expande a la velocidad de la luz—, lo que significa que, conforme pasa el tiempo, se hacen visibles más regiones del universo. Dicho sin ambages, el horizonte crece a la velocidad de la luz. De ahí se sigue que la distancia al horizonte debe ser la distancia que ha recorrido la luz desde el centro de la burbuja durante el tiempo que tiene nuestro universo. En este momento, pues, la lejanía de nuestro horizonte es de alrededor de quince mil millones de años luz. Si pudiéramos ver bien el borde, presenciaríamos el nacimiento del universo. Por desgracia, hasta unos 100.000 años después del Big Bang el universo era opaco a la luz, de modo que sólo es posible retroceder hasta esa época. La información sobre los tiempos anteriores procede de fuentes indirectas.

La importancia del horizonte para la naturaleza de la expansión cosmológica puede entenderse examinando progresivamente momentos anteriores, retrocediendo hasta la singularidad y el origen del universo. Un segundo después del Big Bang, el horizonte sólo tenía un diámetro de un segundo luz, que es unos 300.000 kilómetros. A un nanosegundo, escasamente medía más de un pie y en el tiempo más breve que podemos medir, es decir, en el primer jiffy, el horizonte abarcaba un volumen de espacio tan pequeño que el número de «burbujas» que cabrían en un dedal es de uno seguido de cien ceros. Ahora las burbujas representan regiones del espacio

que pueden no tener ninguna clase de comunicación con las demás regiones del espacio exterior: la superficie de la burbuja es la mayor distancia de que puede tener noticia el centro de la burbuja.

Lo que está más allá de este límite no puede afectar físicamente a lo que sucede dentro de la burbuja.

Retrasando el reloj hasta el primer jiffy, nos encontramos en el momento en que las fluctuaciones cuánticas perturbaron en tal medida el espacio-tiempo que dejó de existir como un continuo para empezar a comportarse como una espuma. Dentro del jiffy, ni siquiera la ramificación de Everett tiene mucho sentido, de modo que podemos considerar el jiffy como el punto de partida del gran drama cósmico.

¿Qué formas espaciales emergieron de Jiffylandia, donde existían todos los tipos de geometría superpuestos a modo de ondas?

Puesto que el horizonte era tan estrecho en aquel momento, cada agujero, cada puente, cada galería dentro de la espuma de Jiffylandia es comparable, en tamaño, al horizonte, por lo que la forma de expansión Inicial refleja el caos local particular de la era cuántica. No obstante, en una escala mayor, la forma del espacio pudo ser absolutamente cualquiera.

Puesto que las distintas burbujas no pueden saber nada de las otras, no parece haber ninguna razón para que todas se expandan a la misma velocidad. Llegamos ahora a uno de los grandes misterios de la cosmología. Como hemos dicho, las observaciones demuestran que el universo es muy simétrico y uniforme, tanto en cuanto a la

forma en que se distribuyen las galaxias por el espacio como en cuanto a la forma del movimiento expansivo. Si el universo que hizo erupción en Jiffylandia constaba de miríadas de reglones de origen Independiente, ¿por qué debían colaborar todas ellas en conformar un movimiento ordenado y uniforme? Si el universo comenzó por azar, debería haber arrancado expandiéndose de forma muy turbulenta y caótica, y cada burbuja, encerrada en su propio mundo particular por su horizonte, debería explotar de manera distinta. Ninguna influencia física relacionaba las burbujas entre sí, de modo que no tenían ninguna razón para cooperar. Si la energía se distribuyó al azar entre todos los posibles modos de expansión, la mayor parte de la energía debió desembocar en movimientos caóticos y sólo una fracción Infinitésima debió disponer del movimiento regular, uniforme e Isótropo que en realidad observamos. De entre los muchos movimientos caóticos irrelevantes con que el universo pudo haber emergido del Big Bang, ¿por qué ha elegido esta forma de expansión disciplinada?

Un buen sistema de esclarecer la curiosa naturaleza de la expansión cosmológica es pensar en términos del planteamiento hecho en la pág. 24 sobre las condiciones iniciales. Si Imaginamos que trazamos un diagrama en el que cada punto representa una determinada forma de expansión Inicial del universo, solamente uno de los puntos representará una expansión exactamente homogénea e Isótropa.

Puesto que nosotros sólo podemos detectar, por razones puramente

tecnológicas, los alejamientos de la uniformidad a partir de un cierto valor mínimo de variación, todo lo que podemos decir es que el universo es muy aproximadamente homogéneo e isótropo, con una cierta exactitud (de alrededor del 0,1 por ciento en el caso de la isotropía), de manera que nuestro diagrama tendrá una pequeña gota que representará todas las condiciones Iniciales compatibles con el alto grado de uniformidad que de hecho observamos. Fuera de esta gota están los estados caóticos.

SI el universo ha sido realmente elegido al azar entre estas posibilidades, eso equivale a clavar un alfiler en nuestro diagrama y es evidente que la posibilidad de pinchar la pequeña gota es muy pequeña. Desde luego, la idea es bastante vaga, porque no sabemos cómo medir superficies en el diagrama, de modo que el tamaño de la gota no está bien determinado, pero cualitativamente la idea es bastante sólida: la probabilidad de que el orden actual surgiera por azar parece despreciable.

Hay una útil analogía con la expansión del universo que puede aclarar la cuestión. Imagínese un gran grupo de personas en apretado tumulto. Cada persona representa una región del espacio encerrada en su propio horizonte —una «burbuja» espacial—, de manera que para representar el hecho de que no hay comunicación entre las burbujas ponemos a todo el mundo con los ojos vendados. Así pues, cada cual desconoce el comportamiento de los otros. El grupo compacto representa la singularidad inicial y, a un toque de silbato, todos echan a correr en línea recta alejándose del centro del

tumulto: el universo se expande. El grupo se extiende formando una especie de anillo.

Los corredores tienen orden de mantener el paso de tal modo que el anillo se mantenga tan circular como sea posible mientras se expande, pero ninguno de los corredores sabe a qué velocidad corren sus vecinos, de forma que cada cual escoge una velocidad al azar. El resultado es, con casi total seguridad, una línea rasgada y distorsionada, muy distinta del círculo.

Existe, por supuesto, una pequeña probabilidad de que, puramente por accidente, todos los corredores mantengan el paso, pero es a todas luces muy improbable. Lo que hoy observamos en el universo corresponde a un anillo de corredores tan aproximadamente circular que no existe distorsión detectable en su forma. ¿Cómo ha ocurrido esto: es un milagro? Hace unos diez años, se presentó una ingeniosa propuesta para verificar y explicar esta curiosa simetría. En la metáfora de los corredores equivalía a lo siguiente. Cuando el grupo explota hacia el exterior, inevitablemente habrá corredores más rápidos que sus vecinos. No obstante, tras un cierto tiempo, serán presa de la fatiga y desacelerarán. Por otra parte, sus colegas, que no habrán gastado tan deprisa las fuerzas, tendrán el bastante vigor para alcanzarlos. El resultado final sería, transcurrido un largo período de tiempo, un anillo aproximadamente circular compuesto de corredores bastante agotados, que se afanarían tenazmente en continuar alejándose a una velocidad considerablemente menor.

Traducido a lenguaje cosmológico, la idea es ésta. En el universo primigenio, ciertas regiones del espacio se expandieron con mayor energía (es decir, a mayor velocidad) que otras, y algunas direcciones se alargaron mucho mientras que otras lo hicieron de manera más perezosa. Los efectos de la disipación comenzaron a socavar la energía de los movimientos más vigorosos y a hacerlos más lentos, permitiendo que los movimientos más perezosos los atraparan. Al final, la situación turbulenta y caótica se va estancando y se reduce a un movimiento bastante lento y tranquilo, con un alto grado de uniformidad, que es precisamente lo que observamos.

Para que esta explicación funcione lo primero que es necesario encontrar es un mecanismo de disipación comparable a la fatiga de los corredores que erosione el vigor del universo en expansión. Este mecanismo debe actuar de tal modo que los movimientos enérgicos sean afectados en mayor medida que los movimientos perezosos. Hay varios candidatos a ser este mecanismo. Una posibilidad es la viscosidad ordinaria: el efecto que da lugar al frenado de un avión o de un barco. Otro, que se ha investigado mucho en los últimos años, es la producción espontánea de nuevas partículas subatómicas a partir del espacio vacío. Esto puede ocurrir debido a que la energía del movimiento del espacio puede transformarse en materia de acuerdo con las ideas de la teoría cuántica y de la relatividad esbozadas en el capítulo 4. Los cálculos demuestran que mediante este mecanismo se producen partículas de todos tipos:

electrones, neutrinos, protones, neutrones, fotones, mesones e incluso gravitones. La reacción que provoca en el espacio la aparición de toda esta nueva materia consiste en reducir su fuerza expansiva y ayudar a emparejar su movimiento con el de las regiones vecinas. Un rasgo crucial de este mecanismo es que su eficacia es mayor en los primeros momentos, cuando la velocidad de expansión es mucho mayor. Por tanto, no es de esperar que la turbulencia primigenia sobreviviera mucho tiempo; por el contrario, debió transformarse en partículas.

Cualesquiera que sean los mecanismos que consideremos, el resultado de la disipación de la energía es en último término el calor. De acuerdo con la segunda ley universal de la termodinámica, que regula la organización de toda la energía, cualquier tendencia a la disipación inevitablemente genera calor. En la Tierra, la desmandada disipación de energía de nuestras fábricas y hogares produce tanto calor que los científicos prevén que algún día llegará a amenazar la existencia de los casquetes polares de hielo. En el universo primigenio, la generación de calor debida a la creación de partículas y demás procesos de disipación fue colosal, y el Big Bang adoptó las características de un horno, con temperaturas que excedieron inmensamente todas las conocidas en el universo actual, incluidos los núcleos de las estrellas. Uno de los descubrimientos científicos más estimulantes de todos los tiempos ocurrió en 1965, cuando dos ingenieros norteamericanos descubrieron accidentalmente los restos del calor primigenio mientras trabajaban

en las comunicaciones por satélite para la Bell Telephone Company. Dado que el universo está ahora enormemente distendido en comparación con la época primigenia, este calor se ha enfriado hasta ser casi nulo y el único residuo del ígneo nacimiento del cosmos se mantiene a una temperatura de tres grados por encima del cero absoluto. Esta radiación cósmica de fondo, que llega desde todas las direcciones del espacio, aparentemente baña todo el universo y es una buena prueba de que la teoría del Big Bang tórrido es sustancialmente correcta. También aporta el mejor medio disponible para comprobar la isotropía del universo temprano, pues la radiación calórica transporta información de la época en que el universo pasó de ser opaco a ser transparente alrededor de 100.000 años después del origen. En aquella época la temperatura había descendido a unos cuantos cientos de grados y los gases primigenios ya no absorbían la radiación. En la medida de nuestros conocimientos, el universo de 100.000 años de edad era isótropo con una exactitud del 0,1 por ciento.

El calor primigenio tiene también una importancia crucial para nuestra comprensión de momentos muy anteriores a los 100.000 años. Muy poco se sabe sobre la física especial que rigió el material cósmico durante la fase primigenia, entre el primer «jiffy» y el primer segundo después del principio: sólo unos pocos principios básicos y algunos análisis matemáticos pueden servir de ayuda. Por ejemplo, podemos tratar de calcular cuánto calor exactamente se crea por la disipación de una cierta cantidad de turbulencia y comparar la

respuesta con los tres grados observados, lo que pone de manifiesto hasta qué punto fue caótico el universo primigenio. El resultado es que la cantidad de calor producido por una cantidad dada de turbulencia depende del preciso momento en que se transforma. La razón de esto es que la disipación ocurre mientras el universo se está expandiendo y el movimiento de expansión tiene el efecto de reducir tanto la energía calorífica (que es por lo que ahora es tan fría la radiación primigenia) como la energía de la turbulencia. La investigación matemática demuestra que la energía de la turbulencia desciende mucho más de prisa que la energía calorífica como consecuencia de la expansión, lo que significa que cuanto antes se produce la transformación de la primera en la segunda, mayor energía calorífica tendremos a fin de cuentas. Esta sencilla información plantea una gran paradoja, puesto que todos los mecanismos de disipación, como es la creación de partículas, son más eficaces cuanto más tempranos.

Pasándolo a números, encontramos que casi cualquier clase de anisotropía habría generado más calor del que actualmente constatamos. De hecho, al parecer tenemos en el universo la mínima cantidad posible de calor primigenio.

No es posible que el universo no produzca nada de calor, pues debe presentar «alguna» turbulencia en la fase primigenia. Esto se debe a que, al final del primer jiffy, aparecen las fluctuaciones cuánticas del espacio y éstas, de por sí, dan lugar a irregularidades. Un cálculo aproximado revela cuánto calor producirían estas

fluctuaciones básicas del espacio cuántico y la cifra resulta ser muy próxima al valor observado. Sin duda, ha habido poca disipación adicional a la de la turbulencia cuántica.

Incluso si estamos equivocados en cuanto al mecanismo de disipación, hay otra razón para que una excesiva turbulencia primigenia parezca poco probable. Se puede calcular la aportación de la turbulencia energética al contenido total en masa-energía del universo, así como su efecto sobre la velocidad de la expansión global. El resultado es que cuando predomina la energía de la turbulencia, la velocidad global de la expansión disminuye de modo apreciable. Es como si el universo, al agitarse al azar, se olvidara de mantener la expansión general. Este retraso tiene un importante efecto secundario: que las radiaciones caloríficas que inevitablemente generan las fluctuaciones del espacio cuántico después del primer jiffy —el calor cuántico— no se enfrían tan rápidamente como lo hubieran hecho en un universo que se expandiera con mayor fuerza, en un universo más uniforme. El resultado es que acabamos, una vez más, con demasiado calor. En cualquier caso, tanto si la turbulencia se disipa directamente en calor, como si frena la expansión cosmológica evitando que el calor cuántico se enfríe, el resultado final es aportar una cantidad de calor mayor de la que actualmente detectamos.

Por tanto, parece que la radiación cósmica de fondo es un testimonio del hecho de que el universo nació en una quietud disciplinada, al menos a partir de la primera diezmillonésima de

billonésima de billonésima de billonésima de segundo, ¡lo que no está mal como resultado!

Si el anterior razonamiento es correcto, respecto a lo cual algunos cosmólogos se muestran escépticos, nos devuelve a la paradoja de por qué el universo comenzó siendo tan uniforme. Aquí es donde puede ayudarnos el principio antrópico. Aunque la radiación del calor primigenio es tan poco conspicua —en realidad, se necesita un instrumental muy especial para llegar tan sólo a percibirla—, una centuplicación de su temperatura tendría drásticas consecuencias para la vida. Si la temperatura excediera los 100°C, entonces no habría agua líquida en ninguna parte del universo. La vida sobre la Tierra sería completamente imposible y en principio es dudoso que se pudiera formar ninguna clase de vida. Un aumento del orden del millar de veces amenazaría la misma existencia de las estrellas, al emular las temperaturas de su superficie y dar lugar a un aumento del calor interior. Además, es discutible que las estrellas y las galaxias se hubieran siquiera formado, en presencia de una radiación tan perturbadora. Por lo que sabemos de la disipación de la anisotropía primigenia, parece ser que incluso un mínimo aumento incrementaría el calor primigenio en miles de millones de veces. Por tanto, la temperatura es muy sensible a cualquier turbulencia primigenia.

Tampoco ayuda demasiado el que la temperatura descienda conforme el universo se expande. En la actualidad se necesitan miles de millones de años para que la temperatura se reduzca a la

mitad y todas las estrellas se habrán consumido para cuando disminuya a una centésima de su actual valor. Si la formación de la vida hubiera de aguardar todo ese tiempo, perdería la vital luz estelar de cuya energía depende.

A menos que la conexión entre la turbulencia primigenia y las radiaciones cósmicas de calor sea totalmente errónea, no puede suponer ninguna sorpresa que el universo se esté expandiendo con la uniformidad que lo hace. De no ser así, no estaríamos aquí preguntándonoslo. Podemos considerar que nuestra existencia es un accidente de una improbabilidad casi increíble: entre todos los mundos posibles, nuestro universo eligió precisamente esta estructuración muy ordenada de la materia y la energía que mantiene el cosmos lo bastante frío para que pueda haber vida. O bien, podemos adoptar la interpretación del superespacio con muchos mundos y decir que, entre los innumerables mundos turbulentos y demasiado calurosos del superespacio, existe una pequeña fracción de ellos que son lo bastante fríos para tener vida. Las condiciones óptimas han de encontrarse entre los más fríos y en ellos es donde es más probable que se forme vida abundante. No es ninguna coincidencia, pues, que nos encontremos viviendo en un mundo con un contenido de calor primigenio próximo al mínimo. La mayor parte de los demás mundos están deshabitados. De todo el inmenso haz de universos que existen, sólo en una diminuta fracción similar al nuestro existen criaturas inteligentes que se plantean preguntas profundas sobre la cosmología y la existencia.

El resto recorre sus historias entre tormentas rugientes y calores tórridos que nadie percibe: son estériles, violentos y, en apariencia, sin sentido.

Capítulo IX
¿Es el universo un accidente?

En el capítulo anterior hemos hablado de que el observador debe encontrar determinadas características en su mundo ya que en el caso contrario no podría existir. Si creemos en un único universo, entonces la configuración uniforme de la materia cósmica y la consiguiente frialdad del espacio son casi milagrosas, conclusión ésta que se parece mucho a la tradicional noción religiosa de un mundo conscientemente creado por Dios para que más adelante fuese habitado por la especie humana. Por otra parte, si aceptamos la idea de un conjunto de muchos universos, tal como propone la interpretación de Everett de la teoría cuántica, la estructura del universo no es un accidente increíblemente afortunado, sino el efecto de la selección biológica: nosotros, en cuanto observadores, sólo hemos evolucionado en aquellos universos donde la estructura tiene esta notable uniformidad. En la teoría de los muchos universos, todo el superespacio es real, pero sólo una porción infinitesimal está habitada. La disyuntiva puede parecer más filosófica que física y reducirse a una mera forma de hablar. Cuando un ganador en la ruleta da gracias a Dios mientras otro proclama su buena suerte, ¿acaso están diciendo algo realmente diferente?

En los últimos años, el principio antrópico se ha aplicado a otros rasgos de nuestro universo de los que la vida parece depender de forma sensible. Además de ser muy isótropo, a gran escala el

universo parece homogéneo: uniformemente poblado de materia. No obstante, si fuese demasiado homogéneo, no habría galaxias ni presumiblemente vida. El universo debe, pues, mantener el adecuado nivel de conglomeración: si hay demasiada poca, la materia cósmica permanece en forma de gas desorganizado. Por otra parte, si el material estuviese más concentrado, existiría la amenaza de que desapareciera por completo por acción de la gravedad.

Al ser una fuerza universal, la gravedad atrae a toda la materia hacia toda la materia. El efecto de la gravedad sobre una gran bola de gas consiste en hacerla contraerse progresivamente; y mientras se contrae se libera fuerza gravitatoria que se convierte en calor, sobre todo en las proximidades del centro. En último término, conforme la temperatura interior aumenta y crece la presión del gas, el gas llega a ser capaz de sostener el peso de las capas exteriores: entonces se detiene la contracción.

Esta es la situación del Sol y de otras estrellas, que se mantienen básicamente en equilibrio estable con un radio constante. Por supuesto, el calor no puede retenerse indefinidamente dentro de la bola, pues tiende a fluir hacia la superficie e irradiarse en el espacio exterior. Si el calor perdido no se puede sustituir, la gravedad prevalecerá una vez más y continuará la contracción. No obstante, en las estrellas, la progresiva contracción queda pospuesta en unos cuantos miles de millones de años por una fuente completamente distinta de calor: la combustión nuclear.

La mayor parte de la materia del universo está compuesta de

hidrógeno, el más ligero de los elementos que existen. Los átomos de hidrógeno constan de dos partículas subatómicas, un electrón y un protón, de manera que el núcleo de hidrógeno no es una masa compuesta en la que participen otros elementos. El hidrógeno no es el material más estable por lo que a la estructura nuclear se refiere. En el capítulo 8 se explicó que los núcleos compuestos que contienen muchos protones y neutrones se mantienen unidos por la fuerza fuerte aglutinante del núcleo, que se impone a la repulsión eléctrica entre los protones. En los núcleos ligeros, como el del helio, el del oxígeno, el del carbono o el del hidrógeno, que no contienen muchos protones, existe un premio por juntar los diversos componentes en una unidad: el núcleo así constituido es más estable que las partículas sueltas. Por tanto, liberan energía al formarse. Consiguientemente, se necesita una gran cantidad de energía para superar las fuerzas de atracción del núcleo y dividir estos núcleos en protones y neutrones separados. Por el contrario, los núcleos pesados, como los del plomo, del radio, del uranio y del plutonio, contienen muchos protones y en realidad se produce una pérdida de energía cuando se agregan nuevas partículas al núcleo. Esto se debe a que la repulsión eléctrica conjunta de todos los protones es mayor que la atracción de la fuerza nuclear, con la consecuencia de que la desintegración de los núcleos pesados libera energía. Estos hechos se explotan en las centrales nucleares. La fisión de núcleos pesados para liberar energía es el principio de las centrales nucleares y de las bombas atómicas, mientras que la

fusión controlada de los núcleos ligeros para liberar una cantidad aún mayor de energía sigue en estado experimental. Una fusión descontrolada se produce en la bomba de hidrógeno, y también en el Sol y las demás estrellas. En el interior del Sol, los núcleos de hidrógeno se fusionan entre sí formando el siguiente elemento químico más ligero: el helio. El núcleo de helio contiene dos protones y también dos neutrones, de manera que durante la combustión nuclear han de ganarse dos neutrones para cada nuevo núcleo de helio. Como se ha explicado en el capítulo 8, el neutrón libre se desintegra en un protón al cabo de unos quince minutos. Lo que ocurre en el Sol es el proceso inverso: los protones se transforman en neutrones para colaborar a la síntesis del helio. Las reacciones nucleares que llevan a cabo esta operación son complicadas, pero el resultado neto consiste en traspasar la carga eléctrica perdida por el protón a un positrón (la imagen antimatérica del electrón), que rápidamente se aniquila con un electrón cercano dando lugar a rayos gamma. Otro subproducto del proceso es el llamado neutrino, que deja inmediatamente la escena de la acción y pasa al espacio. Un neutrón se combina con otro neutrón y dos protones para formar el núcleo del átomo de helio, liberando en el proceso nuevos rayos gamma.

Después de estar estallando dentro de la estrella durante eones, los rayos gamma se convierten en energía calorífica que colabora a sostener la estrella contra las fuerzas gravitatorias que tienden a contraería.

La combustión nuclear cesará finalmente en todas las estrellas cuando el combustible se agote y vuelvan a contraerse. Para descubrir lo que ocurrirá después debemos recurrir a la teoría general de la relatividad de Einstein. El análisis matemático demuestra que, mientras la estrella tenga menos material que unos tres soles, las otras fuentes de presión aumentarán y se podrá contener la contracción. Por ejemplo, en las estrellas conocidas como púlsares, el material va siendo progresivamente aplastado hasta que incluso los mismos átomos se colapsan en neutrones. Estas estrellas de neutrones son bolas compuestas casi exclusivamente de neutrones y de una increíble densidad, que sólo miden unos kilómetros de diámetro.

En el caso de las estrellas con una masa superior a tres soles, su sino es aún más extravagante. De acuerdo con la relatividad general, la contracción no puede impedirse y explotan de manera catastrófica en más o menos un microsegundo. El aumento de la gravedad en sus proximidades distorsiona en tal medida el espacio-tiempo que el tiempo se detiene literalmente. Ni la luz ni la materia ni ninguna información puede escapar de su superficie, de modo que ésta aparece negra: un agujero negro. La estrella, una vez retraída en el agujero negro, desaparece efectivamente del universo. Es posible que dentro del agujero encuentre una singularidad, con lo que abandonaría el espacio-tiempo por completo, pero, en cualquier caso, por lo que se refiere al mundo exterior, la materia de que está compuesta la estrella se ha ido para siempre: nada puede

regresar del interior de un agujero negro.

Se cree que los agujeros negros desempeñarán un importante papel en las etapas finales de nuestro universo, cuando probablemente la mayoría de las estrellas acabe sus días dentro de ellos. No obstante, también pudieron ser importantes en las etapas primigenias. La densidad crítica de la materia que se necesita para formar un agujero negro depende de la masa total.

Para una galaxia, basta la densidad del agua, pero en el caso del Sol sería necesaria una densidad de miles de millones de kilogramos por centímetro cúbico. Para formar un agujero negro menor que la masa del Sol se precisarían densidades que excedieran incluso esta colosal cifra. La única vez en que se han producido en el universo esas enormes densidades fue durante el Big Bang, cuando todo el cosmos explotó a partir de una situación ilimitadamente compacta. Algunos cosmólogos han investigado la formación de los agujeros negros en el universo primigenio, pero sus resultados son bastante poco concluyentes, puesto que dependen sensiblemente de las características del material cósmico sujeto a las enormes densidades que se dieron entonces, todo lo cual está muy lejos de nuestros actuales conocimientos. No obstante, es evidente, por razones generales, que es más probable que se produjeran agujeros negros si el material estaba muy apelmazado que en el caso de estar la materia regular y uniformemente distribuida. Parece seguro suponer que un universo que se iniciara en condiciones muy poco homogéneas no emergería del Big Bang poblado de estrellas sino de

agujeros negros.

¿Puede formarse vida en un universo de agujeros negros? El agujero negro ofrece pocas perspectivas a los sistemas que sostienen la vida. La vida sobre la Tierra se basa crucialmente en el calor y la luz solares, y los agujeros negros, por su misma naturaleza, no irradian ninguna clase de energía (aunque, como explicaremos muy brevemente, esto puede no ser cierto en el caso de los agujeros negros microscópicos). Además, en lugar de orbitar serenamente alrededor de una estrella, la masa planetaria, al encontrarse demasiado cerca de un agujero negro, trazaría una inexorable espiral hacia su interior y rápidamente se sumergiría en el olvido dentro del agujero.

¿Cuántos agujeros negros primigenios existen? De momento nadie ha identificado taxativamente un agujero negro, aunque hay algunos candidatos muy firmes. El problema es que, al ser negros, son difíciles de localizar, y la única técnica práctica consiste en buscar perturbaciones gravitatorias de cuerpos más conspicuos motivadas por su proximidad al agujero. Los agujeros negros de una galaxia pueden ponerse de relieve por el efecto que causan en el movimiento de las estrellas, mientras que los cuerpos supermasivos intergalácticos podrían perturbar el comportamiento de galaxias enteras. Es posible medir la masa total de los agujeros negros del universo calculando la gravedad total del universo. Lo cual puede hacerse observando la velocidad a que se desacelera el movimiento expansivo debido a todos los objetos gravitatorios del cosmos. Las

mediciones señalan que la materia luminosa (estrellas, gases, etc.) deben constituir una fracción apreciable de la masa total del universo, de manera que es evidente que no habitamos un universo donde predominen abrumadoramente los agujeros negros.

A pesar de la falta de conocimientos detallados sobre los agujeros negros primigenios, es posible utilizar un razonamiento muy general para calcular en términos aproximados la probabilidad de que el universo emergiera del Big Bang sin una sobrecogedora cantidad de ellos. La posibilidad de realizar este cálculo se basa en ciertos resultados matemáticos nuevos y notables sobre los agujeros negros cuánticos, es decir, sobre la teoría del campo cuántico aplicada a los agujeros negros, obtenidos sobre todo por Stephen Hawking de la Universidad de Cambridge. En 1974, Hawking demostró que los agujeros negros no son en absoluto verdaderamente negros, sino que emiten radiaciones caloríficas a una temperatura característica que depende de su masa. Esta extraordinaria conclusión permite tratar a los agujeros negros de forma bastante parecida a las máquinas térmicas y, en concreto, hace posible estudiar sus propiedades aplicando las leyes universales de la termodinámica.

Durante la última década del siglo XIX, uno de los grandes triunfos de la física teórica fue el descubrimiento de la relación entre el comportamiento termodinámico de un sistema y la probabilidad de una determinada ordenación atómica de sus componentes. Para presentar un ejemplo sencillo, imaginemos un recipiente conteniendo un gas: las moléculas corren por todas partes al azar

chocando entre sí y con las paredes del recipiente. La presión del gas está causada por los impactos de las moléculas mientras que la temperatura es una medida de la velocidad de las moléculas. La energía térmica es sencillamente la energía de su movimiento. Las magnitudes termodinámicas tales como la temperatura, la presión y el calor son medibles en el laboratorio, pero poco podemos saber sobre los detalles de las moléculas individuales, pues son demasiado pequeñas y demasiado numerosas para percibirlas. Sólo cabe observar las propiedades medias en masas de millones de billones de ellas, de tal modo que es imposible constatar su constante revolverse y reordenarse conforme chocan entre sí y se mueven en todas direcciones. Cualquier estado macroscópico concreto del gas (es decir, la temperatura, la presión, etc.) debe estar producido por un enorme número de distintas combinaciones internas de las moléculas. Por ejemplo, el cambio de posición de unas cuantas moléculas quizá no tenga ningún efecto observable sobre la temperatura.

Pero no todas las ordenaciones moleculares conducen al mismo estado macroscópico. Por ejemplo, en el insólito caso de que todas las moléculas se dirigieran al unísono hacia la izquierda, el gas se apilaría en el lado izquierdo del recipiente. Si todas las moléculas se movieran al azar, ¿por qué no podría darse en alguna ocasión este comportamiento? La respuesta la proporcionan el cálculo de probabilidades y la estadística elemental. La probabilidad de que ocurra tal cooperación entre un inmenso número de moléculas

distintas es increíblemente pequeña, aunque no necesariamente igual a cero. Una forma mucho más probable de movimiento es el caótico, en el que las moléculas se dispersan por todas partes con mayor o menor regularidad, lo mismo que es mucho más probable que las cartas barajadas presenten un orden confuso y no un orden por palos. Los choques entre las moléculas actúan como un mecanismo aleatorio de revolverlas y las probabilidades de que miles de millones de partículas se muevan de forma ordenada son despreciables.

Esto ilustra el principio muy general de que es más fácil producir el caos que el orden y, por tanto, que aquél es mucho más probable; éste es el razonamiento que se aplicó en el capítulo anterior para defender que una expansión primigenia ordenada del universo es mucho menos probable que un estado caótico y turbulento. Pero ¿por qué es así?

La razón de que el desorden sea más probable que el orden se encuentra en las estadísticas de la ordenación molecular. Como antes hemos mencionado, las pequeñas reorganizaciones de grupos de moléculas no afectan a las propiedades totales del gas. No obstante, determinados estados son más propicios que otros a las estructuraciones. Por ejemplo, en un estado en que todas las moléculas se precipitan en la misma dirección, no hay la misma libertad para mezclarlas otra vez que en un estado menos ordenado, porque es probable que basten pequeñas alteraciones para romper un comportamiento tan exactamente coordinado. Un análisis

matemático demuestra que la diferencia en capacidad de reordenación de estados ordenados y de estados desordenados puede ser abrumadora. Determinados estados —los muy desordenados— admiten muchísimas más variaciones que los estados más ordenados. De modo que si la organización molecular se revuelve constantemente al azar, no se precisará mucho tiempo para que una forma ordenada se rompa en un estado de desorden, una vez conseguido lo cual el estado de desorden es muy estable porque las siguientes modificaciones es más probable que reproduzcan otro estado de desorden que un estado de orden. El principio es la sencillez misma: hay muchas más maneras de dar lugar al desorden que al orden, de modo que es muchísimo más probable que un estado elegido al azar sea muy desordenado.

Equipados con la relación entre el grado de desorden de un sistema y la probabilidad de que su estado se produzca por algún proceso aleatorio, intentaremos determinar cómo encajan los agujeros negros en este esquema termodinámico y valorar la posibilidad de que aparezcan como consecuencia de procesos puramente aleatorios ocurridos en el universo primigenio. A primera vista, el concepto de grado de desorden parece tener una relación algo oscura con los agujeros negros. A diferencia de los gases, que como sabemos están compuestos por miles de millones de diminutas moléculas, los agujeros negros no están en realidad compuestos de nada, sino que son un mero vestigio de materia desvanecida: una zona enormemente distorsionada del espacio vacío. Un examen más

detallado, sin embargo, revela una profunda similitud entre ambos sistemas. En ambos casos carecemos de información sobre su estructura interna. Las moléculas del gas son demasiado pequeñas para percibirlas y el interior del agujero negro no puede transmitir ninguna información al exterior. Lo único que puede medirse en estos sistemas son las características globales, como la masa total, el volumen, la carga eléctrica, el grado de rotación, etc. Los valores concretos de estas características globales pueden ser el resultado de muy distintos procesos: las moléculas gaseosas pueden reordenarse y el mismo tipo de agujero negro puede proceder de estrellas colapsadas con muy distintas estructuras internas.

La verdadera y sorprendente similitud entre los gases y los agujeros negros surge del sometimiento de estos últimos a una nueva ley que parece ser una analogía directa de la ley central de la termodinámica: la llamada segunda ley de la termodinámica. Esta segunda ley establece que el desorden total siempre aumenta con el tiempo. El agujero negro obedece a una ley que dice que siempre aumenta de tamaño con el tiempo, de tal modo que cabe sospechar que el tamaño del agujero es una medida de su grado de desorden. Esta sospecha se vio confirmada al estudiar la relación entre la temperatura de los agujeros negros, tal como la calculó Hawking, y su masa: los agujeros negros resultan cumplir la misma relación entre desorden y temperatura que los gases, si se utiliza la extensión del agujero como medida del desorden. A su vez, la extensión está relacionada con la masa del agujero, de manera que

disponemos de los medios para comparar el grado de desorden de una masa dada de material con el desorden equivalente que se produciría si ese material cayera en un agujero negro. En el caso de una masa de materia como la del Sol, el desorden del agujero negro llegaría a ser varios miles de billones de veces superior que el del Sol real, resultado éste que conlleva una consecuencia fatídica: de ser todo lo demás igual, es inmensamente más probable que la materia del Sol esté dentro de un agujero negro que no en una estrella. Lo esencial del enunciado es «de ser todo lo demás igual». Evidentemente, todo lo demás no es igual en nuestro universo, o bien no habría Sol ni las demás estrellas. De revolverse la materia primigenia al azar, hubiera sido enormemente más probable que produjera agujeros negros a que produjera estrellas, puesto que los agujeros, al ser mucho más desordenados, pueden producirse por mucho mayor número de procedimientos. Por cada estrella que se ha formado, debieron acompañarla incontables miles de millones de agujeros negros más fáciles de producir.

La verdadera fuerza de estos argumentos se pone de relieve cuando se examina la relación matemática exacta entre desorden y probabilidad. Se trata de hecho de la llamada relación exponencial, equivalente al modo en que crece una población ideal que duplica su tamaño a cada intervalo fijo de tiempo, por muy grande que sea su tamaño. Por tanto, cada vez que el grado de desorden aumenta en una cantidad determinada, se duplica la probabilidad de que se presente tal estado. La relación es tal que cuando las cifras se

hacen grandes, una pequeña cantidad de desorden adicional representa una probabilidad muchísimo mayor. En el caso del Sol, cuyo desorden es tan sólo de una centésima de millonésima de billonésima del agujero negro equivalente, la probabilidad en contra de que surgiera el Sol en lugar de un agujero negro como consecuencia de un proceso puramente aleatorio sería, aproximadamente, de un uno seguido del mismo número de ceros. Es decir, ¡de un uno seguido de cien millones de billones de ceros!, lo que es una probabilidad bastante pequeña cualquiera que sea el rasero.

Si se aplica el mismo razonamiento a todo el universo, la probabilidad en contra de un cosmos estrellado resulta exorbitante: un uno seguido de cien mil millones de billones de billones de ceros, como mínimo. Aun cuando los razonamientos sobre la probabilidad del desorden sólo tengan una validez aproximada, la conclusión a sacar debe ser que vivimos en un mundo de una improbabilidad astronómica.

Una vez más, cabe invocar el principio antrópico para sostener que entre el abrumador haz de universos dominados por los agujeros negros hay fracciones casi inconcebiblemente pequeñas en las que, contra todas las probabilidades, la materia primigenia eludió la aniquilación y se organizó en forma de estrellas capaces de sustentar la vida.

Estas consideraciones conjuran el extravagante espectáculo del superespacio: mundo sobre mundo en movimiento caótico, poblado

de inmensos agujeros negros que van errantes y chocan en erupciones titánicas del espacio-tiempo, bañados todos en el tórrido calor generado por el ruido cuántico y amplificado por la disipación primigenia. ¿Quién imaginaria que, en medio de este infinito número de universos de pesadilla, existen unos pocos insignificantes que milagrosamente han maniobrado alejándose del infierno dominado por los agujeros negros y han procreado la vida? Nosotros podemos imaginarlo, porque nosotros somos esa vida.

Como hemos observado al iniciar este capítulo, parece que el universo deba comenzar con grumos y abolladuras para que puedan formarse las galaxias y las estrellas. Aunque las nubes de gases tienen tendencia natural a contraerse bajo la acción de la gravedad, han de luchar contra la expansión del universo que actúa en sentido contrario, es decir, que tiende a dispersarlas. Hubo un cierto momento en que los astrónomos confiaban en explicar la existencia de las galaxias según el supuesto de que el material que había explotado en el Big Bang era inicialmente muy uniforme, pero que posteriormente ocurrieron fluctuaciones aleatorias que dieron lugar a acumulaciones desperdigadas de materia. Estas acumulaciones operaron como núcleos alrededor de los cuales se asentaron otros materiales debido al aumento de la gravedad local, de tal forma que, gradualmente, el material gaseoso fue fragmentándose en distintas protogalaxias que, a su vez, se fragmentaron en estrellas. Por desgracia, parece haber pasado demasiado poco tiempo desde el principio del universo para que las

galaxias hayan crecido de manera natural por este procedimiento. La única posibilidad es que existieran algunas regiones densas desde el principio, que posteriormente se convirtieron en las galaxias que ahora vemos.

De momento, en lo dicho sobre el principio antrópico nos hemos limitado a los problemas de la ordenación de la materia y la energía en el universo. Es posible ir más lejos y tener en cuenta circunstancias en que las propiedades físicas fundamentales de la materia pueden variar de un mundo a otro. Como vimos en el capítulo 8, es imposible saber cuáles de nuestras leyes de la naturaleza son meramente casos especiales de leyes más generales, de manera que muchos de los rasgos de la física que damos por supuestos podrían ser bastante distintos en otras regiones del superespacio. Para tomar un primer ejemplo, nuestra actual teoría de la gravedad (teoría de la relatividad general de Einstein) incluye la restricción de que la fuerza de la gravedad entre dos masas normales a una distancia dada es la misma cualquiera que sea el lugar en que se sitúen y cualquiera que sea el momento en que ejerzan su fuerza. En el caso de la Tierra, ésta atraerá a una manzana con la misma fuerza tanto si la Tierra se halla en la Vía Láctea como si está en la nebulosa de Andrómeda.

Del mismo modo, atraerá la manzana con la misma fuerza hoy que lo hacía hace mil millones de años. La ley de la constancia de la gravedad parece estar bastante bien comprobada por la experiencia, aunque aún queda lugar para la duda, y algunos físicos han

propuesto teorías contrarias a la de Einstein, en las que la fuerza de la gravedad puede variar de un lugar a otro y de un momento a otro. Si la fuerza de la gravedad no está fijada de una vez por todas por los principios fundamentales de la física, cabe suponer que variará de un mundo a otro del superespacio. Nos enfrentamos, pues, al reto de explicar por qué entonces en nuestro universo tiene la fuerza que tiene; en particular, ¿por qué es mucho más débil que todas las demás fuerzas de la naturaleza?

Todo el que esté familiarizado con la física elemental sabrá que las leyes matemáticas que describen los sistemas físicos fundamentales con frecuencia sacan a relucir números como 4π y 1/2. Muchas veces estos números tienen un origen geométrico o bien están relacionados con las dimensiones del espacio. Hace unos cincuenta años, a raíz de la aparición de la teoría general de la relatividad, muchos físicos trataron de construir una teoría unificada donde la gravedad de Einstein se combinara con la anterior teoría del electromagnetismo de Maxwell. La esperanza era, y sigue siendo, que de alguna manera los fenómenos gravitatorios y los electromagnéticos fueran ambos manifestaciones de un campo básico unificado. Nadie ha logrado crear tal teoría, aunque la investigación prosigue. Una de las desalentadoras dificultades a que se enfrentan los teóricos del campo unificado es la inmensa diferencia que existe en términos de fuerza entre las fuerzas electromagnéticas y las gravitatorias. La gravedad que actúa entre los elementos del átomo viene a ser menos fuerte que la atracción

eléctrica en diez elevado a cuarenta (10^{40}) veces.

¿Qué teoría física podría ser capaz de manejar una cifra tan enorme?

Una curiosa complicación de este misterio la señalaron por primera vez el astrónomo Eddington y el físico Paul Dirac. Cuando medimos intervalos de tiempo, los calibramos con algún período natural de vibración o rotación: la rotación de la Tierra, las oscilaciones de un cristal de cuarzo o las vibraciones de la onda luminosa. Si preguntamos cuál es la unidad temporal más pequeña que tiene significación fundamental para la estructura de la materia, nos vemos llevados a examinar las vibraciones de los átomos y de sus núcleos. Las partículas subatómicas situadas en el interior de los núcleos de los átomos oscilan a una escala temporal increíblemente corta para los estándares de la vida cotidiana: alrededor de una billonésima de billonésima de segundo o bien el tiempo que tarda la luz en atravesar un núcleo. Este pequeño intervalo de tiempo constituye una unidad fundamental y natural con la que comparar otros intervalos, aunque cuesta bastante pensar que incluso esta duración fugaz es diez elevado a veinte veces mayor que la unidad natural de gravedad cuántica —el jiffy—. Preguntándonos ahora cuál es la mayor unidad natural de tiempo disponible, nos vemos llevados a la edad del universo, que se ha calculado por distintos procedimientos en alrededor de quince mil millones de años. En nuestras unidades subatómicas fundamentales esta duración resulta ser de alrededor de 10^{40} o bien un uno seguido de cuarenta

ceros: la misma enorme cifra en que la gravedad es más débil que el electromagnetismo.

El misterio consiste en ¿por qué ocurre que vivimos precisamente en la época en que la edad del universo es igual al mágico número 10^{40}? Dirac sostuvo que este número está tan por encima de los que habitualmente se encuentra en la teoría física, como 4π y 1/2, que lo más probable es que las dos proporciones anteriores sean iguales por coincidencia. Mantuvo que estos números están vinculados por una teoría física que exige que la igualdad se mantenga cierta en todas las épocas, rasgo que puede lograrse imponiendo que la gravedad se debilite con el tiempo. En el pasado remoto, cuando el universo era menor de edad, la gravedad era más fuerte que ahora.

Por desgracia, hay pocas pruebas experimentales de la debilitación de la gravedad y una explicación distinta de la «coincidencia» la proporciona el principio antrópico. El argumento que utilizamos aquí es una adaptación del originalmente sugerido por el astrofísico norteamericano Robert Dicke y el físico-matemático británico Brandon Carter.

Siempre se ha observado que la existencia de elementos pesados, como el carbono, se considera esencial para la vida tal como la conocemos. El carbono no estaba presente en los inicios del universo (véase más adelante) pero fue sintetizado por estrellas que murieron mucho antes de que se formara el Sol. Encontró la forma de llegar a la Tierra porque algunas de esas estrellas explotaron y lanzaron el carbono al espacio interestelar. Parece probable que la

vida no pudiera florecer en el universo hasta que por lo menos cumpliera su ciclo una generación de estrellas. Por otra parte, una vez que una estrella ha muerto, quizá para convertirse en un agujero negro o en un objeto compacto y frío, es muy improbable que la vida se forme en sus proximidades. Como lo probable es que sólo haya un corto número de generaciones de estrellas antes de que la mayor parte de la materia de las galaxias se haya consumido, de ahí se deduce que la vida sólo puede surgir en el universo en el período comprendido entre la vida de una y de unas pocas estrellas típicas.

Ahora bien, la vida de una estrella puede calcularse a partir de la teoría de la estructura estelar. Depende tanto de la fuerza de la gravedad, que mantiene unida la estrella, como de las fuerzas electromagnéticas, que controlan que la energía circule eficientemente por el interior de la estrella y sea irradiada al espacio. Los detalles son complicados, pero cuando se resuelven dan como resultado que la vida de una estrella típica, en unidades subatómicas naturales, corresponde exactamente a la razón entre las intensidades de las dos fuerzas: 10^{40}, factor diez más o menos. La conclusión es que «cualquiera» que fuera el valor de esta razón, las criaturas inteligentes sólo estarían ahí para preguntarse por esa cifra cuando el universo hubiera existido durante aproximadamente este mismo número de unidades temporales subatómicas. Podemos ir más allá y estudiar por qué este número es tan grande: es decir, por qué la gravedad es tan pequeña en comparación con las fuerzas

electromagnéticas. Nuestra existencia sobre la Tierra dependió de que el Sol permaneciera estable durante los varios miles de millones de años que ha tardado la evolución biológica en crear criaturas inteligentes. De ahí que la vida de una estrella típica, como es el Sol, deba tener al menos tal duración, lo que prohíbe que la gravedad sea apreciablemente mayor de lo que es. De lo contrario, el Sol se habría consumido antes de que hubieran podido desarrollarse los seres humanos.

La fuerza de la gravedad también está íntimamente relacionada con otro rasgo fundamental de nuestro universo: su tamaño. La mayor parte de la gente se da cuenta de que el universo es grande. En primer lugar, las distancias entre las estrellas son enormes. La estrella «más próxima» al Sol está a casi cuarenta y cinco billones de kilómetros de distancia (más de cuatro años luz) y la Vía Láctea tiene un diámetro de cien mil años luz. Nuestros telescopios son capaces de detectar galaxias situadas a varios miles de millones de años luz de distancia.

En segundo lugar, el número total de estrellas es mareante. Nuestra galaxia, que es una galaxia normal, tiene alrededor de cien mil millones de estrellas y hoy sabemos que existen muchos miles de millones de galaxias.

No obstante, hay un cierto sentido en que el universo tiene un tamaño limitado. Por así decirlo, hay un «borde» situado a unos quince mil millones de años luz. No se trata de un verdadero borde físico, sino que es el horizonte mencionado en la pág. 190, más allá

del cual la curvatura del espacio-tiempo no nos permite seguir viendo. En este sentido, el universo tiene un tamaño natural y cabe preguntarse por la medida de este tamaño en la mínima unidad de medida disponible: el tamaño del núcleo atómico. La respuesta vuelve a ser de alrededor de 10^{40}, pero esta vez no es sorprendente. En realidad estamos calculando la misma cantidad que la edad del universo en unidades naturales de tiempo, sólo que utilizando las distancias (años luz) en lugar de los tiempos (años). Por tanto, el universo es así de extenso porque es así de viejo y es así de viejo debido al tiempo que ha necesitado la vida para evolucionar.

Volviendo ahora al contenido del universo, podemos determinar el total de materia utilizando la mínima unidad de materia disponible: el átomo. El número de átomos del universo (comprendido en nuestro horizonte) resulta ser de alrededor de 10^{80}, o sea un uno seguido de ochenta ceros, que es precisamente el cuadrado del otro gran número (10^{40}) de que ya nos hemos ocupado. Es posible confrontar esta nueva «coincidencia» utilizando asimismo el principio antrópico, puesto que ocurre que la suma total de materia del universo está relacionada con su edad. La razón es que el universo se está expandiendo y que la densidad de la materia controla el movimiento expansivo. Si el total de materia fuese mucho mayor, la gravedad detendría la expansión y haría que el universo se colapsara antes de poder desarrollarse la vida inteligente. Por otra parte, si la materia fuese más escasa, la expansión sería más rápida. En ese caso, sería improbable que las

galaxias y las estrellas hubieran surgido nunca en abundancia. Como ya hemos mencionado, las galaxias y las estrellas se forman por concentraciones de gases y polvo cuya gravedad local atrae a los materiales que las rodean con mayor fuerza que los dispersa la expansión del universo. Si la densidad de la materia del universo fuera muy inferior, la gravedad local sería menor y, por lo tanto, impotente para impedir que la materia se alejase. Además, la velocidad de expansión sería mayor, lo que haría que el enfrentamiento de las dos tendencias fuese aún menos favorable a la formación de regiones densas. Por lo que parece, no podríamos existir en un universo con una densidad muy distinta de la que tiene el que realmente habitamos.

Para que exista la vida, la densidad del universo debe ser lo bastante grande para que la materia quede localmente atrapada en las estrellas, pero no tan grande que todo el cosmos se desplome. Podemos utilizar la teoría general de la relatividad de Einstein para calcular la densidad óptima que sella el compromiso entre las dos alternativas y utilizar esta densidad, conjuntamente con el tamaño del universo, para calcular el correspondiente número total de átomos. El cálculo en sí es elemental y la respuesta puede expresarse como la edad del universo dividida por la gravedad de un átomo. Este resultado es numéricamente muy similar al que resulta de multiplicar las dos proporciones mencionadas más adelante: la edad del universo multiplicada por la razón entre la atracción eléctrica y la gravedad del átomo es de $10^{40} \times 10^{40}$, es decir, 10^{80}.

Tal es precisamente el número de átomos observados. Por tanto, esta nueva «asombrosa coincidencia» ya no resulta sorprendente después de todo, dado que estamos vivos para comentarla.

Argumentos similares al de la gravedad se han propuesto en relación con la fuerza nuclear. Vimos en el capítulo 8 que la estabilidad de los núcleos dependía del equilibrio entre la atracción nuclear y la repulsión eléctrica, de tal modo que los cambios de intensidad de cualquiera de ellas amenaza la estructura de los núcleos compuestos que son la base de la vida. Por ejemplo, basta que la carga eléctrica que transportan los protones se multiplique por diez para desintegrar los núcleos de carbono; una similar disminución de la fuerza nuclear produce el mismo efecto. Fred Hoyle ha señalado que la existencia de carbono puede depender de un modo aún más delicado de las fuerzas nucleares, puesto que, según la teoría del Big Bang, la estructura actual del universo no podría resistir las enormes temperaturas de la fase primigenia. Incluso los átomos y los núcleos serían aplastados por la energía calorífica y, por lo tanto, tal como antes se ha señalado, faltaría el átomo de carbono. Antes de que transcurrieran los primeros minutos, las temperaturas, superiores a los miles de millones de grados, aseguraban que sólo podían existir protones, neutrones y otras partículas independientes; ningún núcleo compuesto podía formarse en medio de tan intenso calor. Conforme el universo se enfrió, comenzaron a formarse los núcleos compuestos, sobre todo mediante la fusión de neutrones y protones en helio. Los cálculos

demuestran que alrededor de una cuarta parte del material acabó en forma de helio, pero casi no se creó ningún elemento más pesado.

Las razones de que la síntesis nuclear fuese incompleta se deben a que, al cabo de pocos minutos, la temperatura había descendido demasiado para que prosiguiera la combustión nuclear. El universo sólo tuvo unos cuantos minutos, entre el calor abrasador y las temperaturas del plasma enfriándose en picado, durante los cuales pudo fraguar núcleos compuestos. No bastaron para que hubiera una gran producción, lo que explica que el universo esté compuesto casi exclusivamente de hidrógeno y helio.

El carbono, el elemento vital, se sintetizó mucho después, cuando se restablecieron temperaturas del tipo primigenio en el centro de las estrellas. El carbono únicamente se forma después de que una buena parte de la estrella se haya convertido en helio. El núcleo de carbono consta de seis protones y seis neutrones, mientras que el de helio contiene dos protones y dos neutrones, de manera que el carbono se forma cuando chocan simultáneamente tres núcleos de helio. En el tórrido interior de las estrellas se producen abundantes choques, puesto que las partículas se disparan hacia todas partes de forma caótica, pero un encuentro triple, como es natural, es mucho más raro que el choque de dos núcleos. La fusión de tres núcleos de helio en un núcleo de carbono es, en consecuencia, algo que ocurre pocas veces y que seguramente habría carecido de importancia a no ser por un hecho aparentemente fortuito. Los tres

núcleos de helio se funden en dos etapas: primero se unen provisionalmente dos de ellos, constituyendo un núcleo de berilio. Esta unión tiene una breve duración y el que se logre la síntesis del carbono depende de que se logre capturar de forma eficiente un nuevo núcleo de helio. La eficiencia de la captura nuclear varía enormemente en concordancia con la energía, aumentando si el cuerpo compuesto se queda con una energía que se aproxima a uno de sus niveles cuánticos de energía interna natural. Hoyle señaló que el berilio más el helio poseen de hecho un nivel energético muy próximo a la energía media que se encuentra en el centro de las estrellas calientes, y esta aparente coincidencia es la causa de la abundante producción de carbono, que posteriormente se dispersa por el espacio cuando las estrellas explotan.

Además, es importante que una vez formado el carbono no se destruya de inmediato por nuevas síntesis y capturas de helio. No obstante, por suerte, en los sistemas compuestos de helio-carbono (que en realidad es oxígeno) no existe ningún nivel energético, de manera que el posterior agotamiento del carbono para generar elementos aún más pesados es bastante lento. Las energías en que se producen estos niveles vitales dependen de la intensidad de las fuerzas nucleares, de forma que un ligero cambio podría ser desastroso para la vida basada en el carbono. Si las fuerzas nucleares adoptan toda clase de valores en los demás mundos del superespacio, es evidente que sólo aquellos universos, como el nuestro, donde toman valores muy concretos pueden sustentar una

floreciente vida basada en el carbono.

Otra sutil forma en que la vida depende de las fuerzas nucleares es la mencionada por Freeman Dyson. Dentro del hidrógeno ordinario hay una pequeña fracción que se conoce como hidrógeno pesado o deuterio. Químicamente es idéntico al hidrógeno ordinario, pero el núcleo no contiene sólo un protón, sino un protón y un neutrón combinados. La teoría indica que hay una fuerte oposición entre el punto de energía cuántica cero, que tiende a evitar que los neutrones estén atrapados, y la fuerza de atracción nuclear. En el caso del deuterio, la atracción gana por poco y, como confirma la experimentación, el núcleo del deuterio está poco ligado. Si dos protones se encuentran, la historia es distinta. Los protones tienen que enfrentarse a la repulsión eléctrica y también a los efectos del principio de exclusión de Pauli (véase capítulo 4), que impide que dos protones se sitúen demasiado cerca. En el caso del diprotón, la repulsión triunfa y no se consigue constituir una unión estable. No obstante, de ser la fuerza nuclear algo más fuerte (aunque tan sólo fuera en un pequeño porcentaje), el diprotón se convertiría en realidad. No seguiría siendo un diprotón durante mucho tiempo, porque existe una bonificación energética en el caso de que uno de los protones se convierta en neutrón mediante el proceso de desintegración beta, gracias al cual el diprotón se transmuta en un núcleo de deuterio.

Dyson estudia el efecto de estas posibilidades sobre los procesos nucleares ocurridos en el universo primigenio y señala que toda la

materia que actualmente se halla en forma de hidrógeno habría formado diprotones y luego deuterio inmediatamente después del Big Bang. Con deuterio en lugar de hidrógeno como materia prima, el horno primigenio hubiera procesado el combustible nuclear a una velocidad enormemente mayor, engullendo todo el deuterio en núcleos de helio, y dando lugar a un universo virtualmente compuesto en un cien por cien de helio. Las estrellas como el Sol, que permanecen durante miles de millones de años apaciblemente quemando hidrógeno en una situación estable, no existirían. Tampoco habría agua (que es el dióxido de hidrógeno), imprescindible para la vida tal como nosotros la conocemos. Al parecer, la vida depende decisivamente del semi fracaso del diprotón.

La otra fuerza nuclear —la llamada interacción débil, que es la causa de las radiaciones beta— también es vital para la vida del universo, en dos sentidos. El primero se refiere a los constituyentes de la materia primigenia, a partir de los cuales se sintetizó el helio en los primeros minutos.

El helio está compuesto de dos protones y dos neutrones, de manera que la cantidad de helio depende de la proporción de neutrones que hubiera en las primeras etapas. En realidad, casi todos los neutrones disponibles de la materia primigenia se incorporaron a los núcleos de helio, de modo que el hidrógeno de que está compuesto la mayor parte del universo es, de hecho, el residuo de los protones que no se emparejaron con neutrones

debido a la escasez de estos últimos. La energía calorífica del horno primigenio la compartieron todas las especies de partículas subatómicas, y en los períodos muy primerizos se estableció un equilibrio entre la cantidad de energía utilizada para formar protones y la cantidad utilizada para formar neutrones. Este equilibrio se mantiene gracias a la fuerza débil: si existe una superabundancia de neutrones, una parte de ellos se utilizará en la radiación beta para convertirlos en protones, y viceversa, haciendo que su proporción se mantenga en equilibrio. Se trata de un servomecanismo que actúa con eficacia mientras las perturbaciones exteriores no lo entorpezcan, pero debe tenerse en cuenta el hecho de que la materia primigenia está incrustada en un universo que se expande en forma de explosión. Al principio, el movimiento explosivo no puede romper el equilibrio, porque los neutrones y protones están muy calientes y compactamente apretados. Alrededor de transcurrido el primer segundo, sin embargo, la densidad y la temperatura han descendido lo suficiente —a tan sólo diez mil millones de grados— para que el equilibrio sea insostenible y la proporción entre neutrones y protones permanezca congelada en el valor que tiene en este momento. Los cálculos demuestran que la proporción debió ser de un quince por ciento, lo que da lugar a un treinta por ciento de helio y un setenta por ciento de hidrógeno, que son exactamente las cifras que observamos en la actualidad.

La importancia de la intensidad de la fuerza débil se debe a que también controla el momento en que el equilibrio comienza a fallar.

De ser esta fuerza menor, no hubiera podido mantener tanto tiempo el equilibrio frente a la rápida expansión. Esto es vital porque en los momentos anteriores al primer segundo hubo una mayor desproporción de neutrones, debido a las siguientes razones. Los neutrones son un 0,1 por ciento, más o menos, más pesados que los protones, de manera que gastan más energía para constituirse. Si la energía disponible escasea, esta diferencia de masa favorece a los protones en comparación con los neutrones, que es la razón de que en el primer segundo haya un ochenta y cinco por ciento de protones y un quince por ciento de neutrones. No obstante, en los momentos anteriores, la temperatura es superior, de modo que disponen de mayor cantidad de energía para repartirse entre ellos. La competencia de las masas no es entonces, pues, tan brutal y reciben cantidades similares, lo que da lugar, aproximadamente, a una proporción del cincuenta por ciento, mitad neutrones y mitad protones. Si fuera ésta la proporción cuando falla el equilibrio, daría lugar a una producción del cien por cien de helio, puesto que cada protón se emparejaría con un neutrón y no dejarían residuo de protones libres para formar hidrógeno. Como ya hemos dicho, un universo falto de hidrógeno no contendría agua ni estrellas estables de larga duración, lo que presenta muy oscuras perspectivas para la vida.

En segundo lugar, la fuerza débil es vital para la vida a la hora de la muerte de las grandes estrellas. Determinadas estrellas, una vez que han sintetizado en su interior elementos tales como el carbono y

el oxígeno, comienzan a sufrir una falta de combustible.

Esta crisis es lenta pero progresiva, hasta que el núcleo de la estrella no puede ya generar el calor necesario para impedir su colapso o desmoronamiento por obra de la gravedad. El resultado es una creciente contracción seguida de una explosión súbita y violenta que libera fuerzas titánicas. En concreto, inmensas cantidades de neutrinos, que son partículas subatómicas tan tenues que atraviesan con facilidad la Tierra sin que las percibamos, se liberan y brotan en cascada desde el centro de las estrellas grandes. Tal es la densidad del centro de las estrellas —alrededor de mil billones de veces mayor que la del agua— que incluso estas efímeras partículas no encuentran modo de salir al exterior. El exacto valor de esta resistencia al flujo de neutrinos depende de la intensidad de la fuerza débil, que controla la interacción de los neutrinos con el resto de la materia. De ser mayor, estos neutrinos no escaparían en absoluto del centro.

Cuando llegan a las capas exteriores, los neutrinos las vuelan en una terrible explosión que ilumina la galaxia entera, arrojando al espacio una cantidad de energía miles de millones de veces mayor que la que lanzan las estrellas normales. Este sobrecogedor acontecimiento se denomina una supernova, y entre los residuos desmenuzados de las estrellas se encuentran elementos como el carbono y el oxígeno. Estos elementos son absorbidos por otros sistemas estelares y, en último término, se convierten en la materia prima con la que se formarán los planetas y la vida. De no ser así se

produciría un mundo carente de materias primas y, presumiblemente, de vida.

Probablemente el mundo tiene muchos más rasgos indispensables para la existencia de la vida y que contribuyen a la sensación general de inverosimilitud que da el mundo que observamos. No tenemos ni idea, por ejemplo, de por qué hay tres dimensiones del espacio y una del tiempo. Los físico-matemáticos suelen estudiar cómo diferirían las leyes de la física si las dimensiones fuesen distintas, y no cabe duda de que el mundo sería un lugar muy extraño de sólo haber dos dimensiones espaciales, por ejemplo. No sabemos si en ese caso la vida sería imposible.

No comprendemos por qué las partículas subatómicas tienen la masa que tienen en lugar de tener cualquier otra. Desde luego, sabemos que si la masa del electrón, por poner un ejemplo, fuera cien veces inferior, entonces las órbitas atómicas empezarían a colisionar con los núcleos y la química se vería drásticamente alterada, pero la razón de que no pueda ser ligeramente distinta es un misterio. Tal vez los valores sean aleatorios y no tengan ninguna significación o tal vez salgan algún día a la luz a resultas de una teoría fundamental, y de este modo se vean obligados a ser los valores que son.

La perspectiva que la especie humana tiene sobre su lugar en el universo está necesariamente influida por la respuesta a la pregunta: ¿hasta qué punto es especial el universo? En los siglos anteriores, cuando la religión aportaba los fundamentos de la

concepción humana de la naturaleza, se daba por sentado que era en verdad muy especial. Como hemos señalado en el capítulo 1, las primeras culturas conocieron pocas leyes reales; casi todos los fenómenos se atribuían a dioses y espíritus con motivaciones especiales, de modo que incluso el desenvolvimiento rutinario del mundo giraba alrededor de la especie humana. Con la revolución newtoniana, ganó ascendencia la posición contraria: el mundo era una maquinaria que latía regladamente eón tras eón, totalmente predeterminada por las condiciones iniciales del pasado infinito y por completo al margen de las aspiraciones y preocupaciones de los hombres. La cosmología moderna, sin embargo, postula una creación en un determinado momento del pasado y resurge la cuestión de si este acontecimiento es en un cierto sentido un accidente aleatorio o si es un espectáculo bien organizado.

A todo lo largo de la historia las personas han caído en la trampa de atribuir una organización especial al mundo allí donde no existía. Los dioses de nuestros antepasados manipulaban el mundo y mantenían su actividad. La ciencia moderna suprime a los dioses y los sustituye por las leyes naturales. Darwin incluso suprimió la influencia divina del reino de la biología. En el siglo XX, la mayoría de lo que antiguamente se consideraba milagroso se ve como inevitable consecuencia de las leyes naturales. La existencia de la Tierra ha dejado de considerarse algo extraordinario, pues entendemos, al menos en líneas generales, el mecanismo que dio lugar a la aparición de la Tierra; también sabemos cuándo ocurrió.

Ni siquiera es milagrosa la existencia del Sol, pues podemos observar las estrellas que nacen actualmente dirigiendo los telescopios hacia las nebulosas lejanas. El hombre, que en un tiempo se tuvo por el mayor de todos los milagros, se considera un punto en el camino de la evolución iniciada hace tres mil quinientos millones de años y que, de seguir todo bien, continuará durante otros cuantos miles de millones de años. Los astrónomos prevén planetas repartidos por todo el universo donde habrán surgido formas de vida extraterrestres como consecuencia natural de las leyes de la física y de la química; probablemente hay muchas formas vivas mucho más inteligentes que nosotros, con conocimientos tecnológicos incomparablemente más adelantados que los de la Tierra.

En resumen, la ciencia ha contestado algunas preguntas fundamentales sobre cómo el mundo ha llegado a ser como es, de tal manera que, al menos en líneas generales, podemos escribir la historia de los primeros quince mil millones de años del universo, a partir del primer jiffy. La conclusión principal es que nada ha habido en todo eso de milagroso ni de notable, a no ser el hecho impenetrablemente singular de que exista algo. Nosotros no comprendemos por qué las leyes de la física son como son, aunque podemos admirar su pavorosa belleza y su simplicidad matemática. Pero, dadas estas leyes, el mundo que percibimos parece deducirse automática y naturalmente del Big Bang.

Las consideraciones de los dos últimos capítulos introducen un

elemento de discordia en este esquema bien ordenado, puesto que, si bien no hay nada de particular en nuestra región local del universo —la vida terrestre, el sistema solar e incluso nuestra galaxia—, cuando se trata de los rasgos globales encontramos en realidad algunas particularidades muy sorprendentes. La organización gravitatoria de la materia en el Big Bang se estructuró al parecer con una precisión tal que sobrepasa lo creíble. Mientras que las generaciones anteriores se maravillaban de la delicada organización de nuestro planeta, esta generación da el planeta por sentado y, en su lugar, se maravilla de la cosmología. Por qué se produce esta organización durante el Big Bang, de eso no tenemos ni idea.

Personas distintas interpretarían los resultados de maneras distintas. Para quienes todavía sigue contando la explicación religiosa de la naturaleza, el orden cósmico primigenio sería una manifestación del propósito divino, conformando el universo como un habitáculo muy especial, de manera parecida a cómo lo interpretaban los autores bíblicos en su escala más provinciana. Ciertos científicos verán confirmada su creencia de que éste no es el único universo, sino uno de los incontables miles de millones en muchos de los cuales ocurren cosas menos llamativas. Esos otros mundos no necesitan estar en ninguna otra parte del superespacio. Pueden existir, por ejemplo, en regiones espaciales tan remotas que no sea posible verlos o bien en el pasado lejano o en el futuro, cuando el actual orden de cosas haya terminado.

John Wheeler, que fue el inventor del superespacio, vislumbra un universo que prosigue la expansión hasta un determinado momento final, tras el que se produce la contracción, arrastrando a todas las galaxias unas contra otras, hasta que desaparecen en un gigantesco cataclismo cósmico similar a un Big Bang al revés. En el extravagante mundo de Jiffylandia, al que retornaría el cosmos, toda nuestra física tendría que reelaborarse, de manera que si el universo eludiese de algún modo la singularidad y emergiera otra vez, lo haría con un nuevo conjunto de números, un grado distinto de turbulencia primigenia, quizá nuevos valores en la intensidad de la gravedad y de las demás fuerzas, e incluso con nuevas leyes físicas.

De este modo continuaría ciclo tras ciclo —expansión y contracción— surgiendo una especie de universo de «nueva planta» cada vez. Muchos de estos universos serían, sin embargo, muy poco propicios para la vida, dado que el universo contiene características desapacibles según las leyes probabilísticas. Por último, sin embargo, contra toda probabilidad, los números volverían a salir bien por pura casualidad, y ese ciclo concreto volvería a estar habitado, procrearía criaturas inteligentes y cosmólogos. Si creemos que existen otros innumerables universos, sea en el espacio o en el tiempo, o bien en el superespacio, ya no resulta asombroso el inmenso grado de organización cósmica que constatamos. Lo hemos seleccionado con nuestra misma existencia. El mundo es un puro accidente que tenía que ocurrir tarde o temprano.

Finalmente, habrá quienes no conciban la idea de que realmente existen otros universos. Concederán que el mundo tiene una estructura formidablemente afortunada por lo que a nosotros se refiere, pero aceptarán que se trata de un hecho natural de manera muy parecida a cómo se acepta que el cielo es azul, o bien cuestionaran toda esta filosofía y tratarán de demostrar que, después de todo, nada tiene de especial la organización del universo primigenio. Para establecer esta contrapropuesta será necesario demostrar que el alto grado de uniformidad con que están ordenados la materia y el movimiento cosmológicos ha surgido automáticamente de determinados procesos físicos por un procedimiento que elude la generación de inmensas cantidades de calor. Lo que esto supone es la afirmación de que «todas las cosas no son iguales».

Si entra en juego una nueva física para evitar que se ensayen los estados más favorables a los agujeros negros y para dirigir la actividad del universo hacia la creación de estrellas, ya no resultará sorprendente que el universo no esté dominado por los agujeros negros. De modo similar, si determinado mecanismo físico todavía desconocido evita que los movimientos turbulentos desbaraten y disgreguen toda la energía explosiva y la ordena según el movimiento uniforme y regular que nosotros observamos, entonces no comparecerán las inmensas cantidades de calor que en otro caso hubieran acompañado a la turbulencia.

En la actualidad no es posible dar una respuesta definitiva a estas

cuestiones, porque se sabe muy poco sobre la física del universo primitivo; las condiciones extremas que allí se daban están fuera del alcance de los experimentos actuales y de la mayor parte de los cálculos matemáticos. Pero si bien no es posible afirmar inequívocamente que el universo está conformado y no impulsado automáticamente por la nueva física, al menos podemos llamar la atención sobre los problemas pendientes. Durante siglos la humanidad ha abordado las preguntas sobre la existencia: sobre su propia existencia y sobre la relación entre sí misma y la existencia del universo. Con nuestros conocimientos científicos podemos plantear este problema bajo una nueva luz. El hombre no es un mero espectador del universo, un rasgo incidental que arrastra la marea de acontecimientos del drama cósmico, sino un elemento intrínseco. No importa si los nuevos conocimientos del cosmos primigenio modifican nuestras conclusiones sobre cómo comenzó todo; sabemos, por lo menos, que estamos representando nuestro papel.

Capítulo X

El supertiempo

Y al partir deja tras nosotros
huellas en la arena del tiempo.
H. W. LONGFELLOW, 1807-1882

En un capítulo anterior hemos dedicado bastante espacio al papel del hombre como observador del universo. En concreto, la naturaleza de la realidad y quizá la misma estructura del universo están íntimamente relacionadas con nuestra existencia de individuos conscientes que percibimos el mundo que nos rodea. La aceptación de este papel central del hombre en la naturaleza va a contracorriente de todos los anteriores progresos científicos que lo destituyeron del pináculo de la creación para convertirlo en una forma biológica normal y corriente. Sin embargo siguen habiendo grandes misterios sobre el mecanismo de percepción y la naturaleza de la conciencia en cuanto tal. ¿La percepción del medio ambiente y de la propia existencia es un rasgo exclusivo de la vida humana? ¿Se reduce a los primates? ¿Lo tienen los animales, la vida toda?
Tratar sobre cuestiones de conciencia y percepción es algo ajeno a toda tradición de la ciencia física, que en general pretende hacer abstracción del observador individual y únicamente ocuparse de la realidad objetiva. Los experimentos repetibles, las mediciones dirigidas y anotadas por máquinas, el análisis matemático de los resultados y otras técnicas han sido creados para excluir al

experimentador de la ciencia. No obstante, en los capítulos previos hemos visto que la «realidad objetiva» es una ilusión y que los tan importantes laboratorios y máquinas deben su misma existencia al experimentador humano cuya existencia, a su vez, debe estar entretejida con los rasgos fundamentales de la naturaleza y de la organización del cosmos. Tarde o temprano, los observadores —nosotros— entramos en escena.

Si abordamos en serio la conciencia, nos enfrentamos al rompecabezas de que nadie ha conseguido registrar su existencia en un experimento. Lo que quiere decir que el cerebro humano ha sido muy investigado y se ha comprendido buena parte de su funcionamiento, pero hasta el momento no se ha podido demostrar experimentalmente que la conciencia sea necesaria en cuanto elemento adicional de la actividad del cerebro. Algunos científicos creen que la conciencia es la actividad del cerebro y que eso es cuanto hace falta decir. Para otros, esta idea resulta manifiestamente absurda. Vimos en el capítulo 7 que al menos un científico invoca realmente la conciencia como un sistema físico concreto, superior al cerebro, que es el mecanismo para reducir el estado cuántico a realidad.

Tanto si existe como si no el entendimiento como algo distinto de los procesos cerebrales, hay misterios sobre la misma naturaleza de nuestras percepciones elementales. Nunca es esto más cierto que en nuestra percepción del tiempo. La teoría de la relatividad fue esbozada en el capítulo 2, donde explicamos que los físicos conciben

el mundo con cuatro dimensiones: tres en el espacio y una en el tiempo. Las líneas que atraviesan este continuo del espacio-tiempo representan las historias de los cuerpos conforme desarrollan sus procesos. Las líneas no son independientes, sino que interaccionan por medio de distintas fuerzas. Vemos una gigantesca red de influencias y respuestas que llena el universo y se extiende desde el pasado al futuro. Eso es el universo.

Esta no es la imagen del tiempo tal como nosotros lo percibimos. Volviendo la vista hacia el mundo que nos rodea, vemos que el drama se representa conforme se despliega un acontecimiento tras otro. Nuestra visión del mundo es como una película: pasan cosas, ocurren cambios, los acontecimientos futuros toman cuerpo y de nuevo pasan. En suma, a nosotros nos parece que el tiempo pasa. ¿Cómo puede reconciliarse esta imagen cinética del mundo que realmente percibimos con el cuadro estático de un espacio-tiempo que se limita a estar ahí?

Analicemos más detalladamente la naturaleza del tiempo tal como lo percibimos. En la conversación ordinaria manejamos dos imágenes bastante distintas y quizás incompatibles del tiempo que, sin embargo, coexisten en nuestro entendimiento sin causar a mucha gente ninguna dificultad. En primer lugar, etiquetamos los acontecimientos con fechas: la batalla de Hastings (1066), la elección del presidente Carter (1976), el eclipse total de sol en Gran Bretaña (1999), la hora de mi reloj (3 de la tarde del 12 de noviembre de 1980). El tiempo es una especie de línea que se

extiende por la oscuridad del pasado y por el futuro remoto, donde cada punto de la línea lleva una fecha que consiste en una etiqueta que señala la duración transcurrida en, pongamos, años desde algún acontecimiento arbitrario, como el nacimiento de Cristo, al que se le otorga una especial significación en la comunidad. La renovación de las fechas, como por ejemplo al adoptar el calendario judío o el chino, no altera los acontecimientos ni sus mutuas relaciones, y es tan inofensivo como utilizar metros en vez de pies para medir las distancias.

Asociar los acontecimientos con fechas equivale exactamente a asociar los lugares con las referencias de un mapa. En este sentido, la perspectiva del tiempo como etiquetas de fechas es la adoptada por los físicos, en la que tiempo se limita a estar ahí, estirado como una línea, lleno de acontecimientos interesantes desde el instante del Big Bang hasta el infinito futuro (o hasta el Big Crunch, el Gran Crujido, si lo hay). Hay, con toda seguridad, una sutileza de que los físicos son conscientes y que se ignora en la vida diaria, y es el hecho de que el tiempo está en relación con el estado emocional del observador.

En el capítulo 2 descubrimos cómo la noción de simultaneidad —dos acontecimientos con exactamente la misma fecha— carece de sentido a menos que se localicen en el mismo lugar. Los observadores que se desplazan de distinta manera discrepan sobre si dos acontecimientos son simultáneos o bien sucesivos, de modo que les asignarán fechas distintas. Esta complicación no es un

problema fundamental mientras conozcamos la regla que conecta el conjunto de datos de un observador con el del otro, de manera que podamos intertraducir sus observaciones. La regla se conoce de hecho y la aportan las fórmulas matemáticas de la teoría de la relatividad de Einstein. Además, la regla funciona espectacularmente bien, como han demostrado tantos experimentos de laboratorio sobre el tiempo.

Absolutamente al margen de nuestros acontecimientos etiquetados, utilizamos un modo completamente distinto de lenguaje y de sistema mental sobre el tiempo que se basa en una imagen cinética: el sistema de los tiempos verbales.

Decimos (y pensamos) que la batalla de Hastings «ocurrió» en 1066, que el eclipse de sol «sucederá» en 1999 y que mi reloj marca la hora «actual». El pasado, el presente y el futuro son tan fundamentales para nuestra percepción del tiempo que normalmente los aceptamos sin dudarlo. Gracias a esta perspectiva, el tiempo adquiere una estructura mucho más rica de la que le dan las meras etiquetas cronológicas. En primer lugar, se divide en tres conjuntos. El futuro, que es incognoscible y quizás en parte dócil a nuestra voluntad: contiene acontecimientos que todavía no existen y que quizá ni siquiera se pueden definir debido a la incertidumbre cuántica, pero que en último término existirán. El pasado, que se puede conocer y en parte recordar, contiene acontecimientos que han ocurrido y que nos es imposible modificar, por mucho que lo deseemos. Los acontecimientos existieron en su momento, pero han

pasado más allá de la existencia a una especie de inaccesibilidad fosilizada. Por último, donde el pasado y el futuro se unen tenemos el presente —el «ahora»—, que es algo misterioso y fugaz, sin duración perceptible, que otorga a los acontecimientos que le son simultáneos una especie de realidad concreta que no poseen las imágenes fantasmales e inmateriales de los acontecimientos pasados y futuros. El presente es el momento en que accedemos al mundo, el momento en que podemos ejercer nuestro libre albedrío y alterar el futuro. Esta categoría especial que se concede al presente resuena en las palabras de Longfellow:

> *"¡Actúa, actúa en el presente vivo!" Nuestra visión de la realidad, pues, está firmemente enraizada en la estructura temporal del tiempo.*

La división del tiempo en pasado, presente y futuro es una organización de ideas mucho más elaborada que las simples relaciones entre fechas, cual es la afirmación de que Carter fue elegido «después» de la batalla de Hastings o bien que mi reloj marca la hora «antes» del eclipse de sol. Estos últimos emparejamientos indican relaciones de antes-después absolutamente independientes del momento temporal en que las examinamos. Que Carter es posterior a Hastings siempre fue cierto, es cierto ahora y será siempre cierto en el futuro.

De momento, puede parecer que nada hay especialmente incompatible en la coexistencia de las fechas y los tiempos verbales.

Las paradojas se cuelan, no obstante, cuando se aprecia que el sistema de los tiempos verbales no es estático, sino que se mueve. El presente, que por regla general identificamos con el momento de nuestra percepción consciente, avanza invariablemente hacia el futuro, encontrando nuevos acontecimientos y consignando los anteriores a la memoria y la historia. Alternativamente, podemos ver el «ahora» de nuestra percepción inmóvil y el tiempo fluyendo más allá de nuestra conciencia como un río, borrando el pasado y empujando al futuro hacia nosotros. En ambos casos, la sensación de un tiempo que fluye, que se mueve, que pasa, imbuye el mundo de nuestra experiencia con cambio y actividad.

¿Qué es el paso del tiempo? En literatura, arte y religión se ha expresado de muchas maneras. La más frecuente es la analogía del río; San Agustín (354-430) la presentaba así: «El tiempo es como un río de fuerte corriente formado por las cosas que ocurren; tan pronto surge algo, es arrastrado por las aguas." Para H. D. Thoreau (1817-62) el «Tiempo no es sino un arroyo donde voy de pesca». A veces la imagen del vuelo parece la más próxima. Para Virgilio, «El tiempo vuela, vuela para nunca más volver», mientras que Andrew Marvell (1621-78) ve el tiempo como un «Carro alado».

Robert Herrick (1591-1674) nos aconseja «*Recoged... capullos de rosas mientras podáis, el tiempo vuela sin cesar*».

William Shakespeare vuelve repetidas veces sobre el tema del paso del tiempo. En «Noche de Reyes» es un «torbellino» que «reclama venganza» y este elemento destructivo o vengativo es muy apreciado.

Byron habla de «el tiempo vengador». Ovidio describe «El tiempo devorador de las cosas» y Tennyson advierte que «*El tiempo empuja de prisa hacia adelante... Todas las cosas nos son arrebatadas y se convierten en porciones y parcelas del horroroso pasado*». Herbert Spencer (1820-1903) define el tiempo cínicamente como «*lo que el hombre trata en todo momento de matar, pero que acaba matándolo a él*».

Todas estas imágenes elaboran nuestra profunda impresión del tiempo como movimiento irreversible que da lugar al cambio. Cuando llegamos a la ciencia, las imágenes no son tan gráficas. Los científicos, como todo el mundo, utilizan los tiempos verbales tanto en la vida diaria como para hablar de experimentos y observaciones sobre el mundo, pero en sus análisis teóricos de la naturaleza los tiempos verbales no tienen ninguna función: sólo hay fechas. Nada aparece en las ecuaciones de Newton que corresponda al presente ni tampoco ninguna magnitud que articule el movimiento del tiempo. Por supuesto, el tiempo está ahí y las ecuaciones predicen qué acontecimientos (por ejemplo, cuándo la manzana que cae llegará al suelo) ocurrirán en qué momento, pero ni las ecuaciones de Newton ni ningunas otras de la ciencia pueden decirnos «qué es el tiempo». En los experimentos lo mismo que en la teoría, el laboratorio es incapaz de revelar el flujo del tiempo, puesto que no existe ningún instrumento capaz de descubrir su paso. Como se observó en el capítulo 2, es erróneo suponer que el reloj es ese instrumento. El reloj no es más que un método de asignar fechas a los

acontecimientos; aunque nosotros percibimos el funcionamiento del reloj como un movimiento, es movimiento en el espacio y no en el tiempo (es decir, alrededor de la esfera del reloj). Es nuestra sensación psicológica de un tiempo que se mueve la que, dada la estrecha asociación del reloj con el tiempo, otorga falsamente al reloj la apariencia de medir el paso del tiempo.

La nebulosidad del concepto de un tiempo que se mueve queda bien de manifiesto al preguntarse a qué velocidad fluye el tiempo. ¿Qué mecanismos poseemos para medir la velocidad del tiempo? Si existiera tal máquina, se la podría consultar cada día para descubrir si el tiempo ha ido más lento ese día o bien si el ritmo de los acontecimientos se ha acelerado. La percepción del tiempo de la mayor parte de la gente tiene un carácter variable. Es una experiencia habitual que diez minutos en el sillón del dentista parezcan media hora de un pasatiempo más agradable o que un día repleto de actividad pase más de prisa que otro dedicado a la inactividad o al aburrimiento. Todo esto, por supuesto, son impresiones psicológicas vinculadas al estado mental del sujeto. La velocidad a que pasa el tiempo siempre será de un día por día, una hora por hora, un segundo por segundo. Incluso los días aburridos sólo tardan un día en pasar. Carece de sentido decir «hoy sólo ha durado doce horas» cuando lo que realmente se quiere decir es «hoy parece que sólo haya tenido doce horas».

Si se insiste en mantener la noción de un tiempo que se mueve, entonces surge una flagrante incompatibilidad entre los tiempos

verbales y las fechas. Las fechas de los acontecimientos se fijan de una vez por todas, mientras que las etiquetas de los tiempos verbales cambian en cada momento. Así, la elección de Carter era un acontecimiento futuro en 1975 y hoy es un acontecimiento pasado. ¿Cómo es posible que el mismo acontecimiento, cuya fecha es fija, sea pasado, presente y futuro? Sin duda, «pasado», «presente» y «futuro» no son cualidades intrínsecas de ningún acontecimiento, ni tampoco se pueden precisar en exceso, pues si preguntamos cuándo un acontecimiento es del pasado y se contesta «Cuando ocurrió», eso es pura tautología. ¿Cómo sabemos que ha ocurrido? Porque está en el pasado. El análisis se hace circular.

El presente es igualmente intangible, pues ¿qué es el presente?

Estamos sin duda de acuerdo en que el presente es un momento único (o al menos de una duración tan breve que no podemos percibir su estructura interna), pero ¿qué momento?

La respuesta es, por supuesto, cada momento. Todos los momentos son el momento presente cuando suceden. Pero ¿cuándo suceden? ¡En su momento! La cosa no va a ninguna parte. Incluso después de una profunda introspección se concluye que no se está diciendo nada que tenga la menor sustancia, que las cualidades del pasado, del presente y del futuro son tan manifiestamente obvias, tan fundamentales para nuestra experiencia, que no podemos aproximarnos a ellas por medio de la palabra. San Agustín formuló este dilema cuando dijo que sabía lo que era el tiempo siempre que nadie le pidiera que se lo explicase. En ese caso no lo sabía.

Charles Lamb (1775-1834) expuso así la sensación: «*Nada me produce tanta perplejidad como el tiempo y el espacio; y sin embargo nada me preocupa menos, puesto que nunca pienso en ellos*»

La sensación de que el tiempo realmente pasa y de que existe presente, pasado y futuro no contribuye en absoluto a nuestra comprensión del mundo objetivo, pero estos conceptos son indispensables para organizar nuestros asuntos personales y desenvolvernos en la vida cotidiana. ¿Son absolutas ilusiones o bien nuestra percepción penetra una estructura del tiempo —o del supertiempo— que todavía no se ha revelado en el laboratorio?

¿Depende la verdadera realidad de la existencia del momento presente?

Estas preguntas plantean uno de los mayores desafíos a la ciencia y la filosofía contemporáneas, y no existe el menor acuerdo ni siquiera sobre cómo formular los conceptos relevantes. Sin embargo, como han mostrado los anteriores capítulos de este libro, los recientes avances de la teoría cuántica y de la cosmología comienzan a tocar estos asuntos y nos vamos acercando al momento en que deberán encararse frontalmente.

Examinemos sucesivamente dos puntos de vista contrarios, comenzando por la postura objetivista que quizá sea la adoptada por la mayoría de los científicos y filósofos. Según este punto de vista, el tiempo no pasa y el pasado, el presente y el futuro son meros convencionalismos lingüísticos sin ningún contenido físico. A pesar de sus asombrosas implicaciones, esta posición es fácil de

defender.

El principal argumento es que hay fechas y acontecimientos vinculados a esas fechas. Los acontecimientos tienen relaciones de pasado-futuro, pero no ocurren. En palabras del físico Hermann Weyl: «El mundo no sucede sino que simplemente «es».” En este cuadro las cosas no cambian: el futuro no nace y el pasado no se pierde, pues tanto el pasado como el futuro existen con la misma categoría. Brevemente examinaremos cómo la teoría cuántica concuerda con este cuadro en apariencia determinista, pero de momento cabe señalar que de suscribir la interpretación de la teoría cuántica de los múltiples mundos, entonces no hay un futuro, sino trillones de ellos, a saber, todas las ramificaciones posteriores a este momento. A pesar de esta complicación, el razonamiento fundamental no resulta afectado.

Lo sorprendente es que la imagen anterior parezca tan extraña y escandalosa, dado que es tan manifiestamente exacta en sus distintas aseveraciones. El escéptico replicaría, por supuesto, que las cosas ocurren, que hay cambio.

«Hoy he roto una tetera: este suceso ocurrió a las cuatro en punto y es un cambio para peor. Ahora tengo la tetera rota.” Pero analicemos lo que en realidad dice el escéptico. Antes de las cuatro en punto la tetera estaba intacta, después de las cuatro está rota; y las cuatro es un estado de transición. Esta forma de lenguaje —el lenguaje de los físicos que etiqueta los momentos— transmite exactamente la misma información, pero en un tono menos

personalizado. No hay ninguna necesidad que nos imponga describir los hechos como que la tetera intacta se «transmutó» en tetera rota a las cuatro en punto ni tampoco que el acontecimiento «sucedió» a las cuatro. Se trata de cronologías y de estados de la tetera. No es necesario decir nada más.

"¡Ah!" rechaza el escéptico, «quizá yo no necesite usar el lenguaje del tiempo en movimiento, pero ésa es la forma en que percibo el mundo, ésa es mi sensación psicológica del tiempo: lo siento pasar». Lo cual es un comentario legítimo y a todas luces correcto, porque todos compartimos la sensación básica de que las cosas ocurren a nuestro alrededor y de que el tiempo pasa. Sin embargo, es peligroso basar demasiado nuestra ciencia en las sensaciones psicológicas, pues conocemos muchos ejemplos en que nos extravían. Todos tenemos la sensación de que la Luna es mayor en las cercanías del horizonte que cuando está alta en el firmamento, pero no es así; todos tenemos la sensación de que un declive vertical de cien pies es mayor que la misma distancia horizontal; todos tenemos la sensación de que la Tierra está quieta, pero en realidad se mueve; y así sucesivamente. ¿Podemos tener mayor confianza en nuestras sensaciones sobre el tiempo de la que tenemos en nuestras sensaciones sobre cuestiones espaciales y de movimiento?

Las sensaciones internas de flujo y movimiento son fáciles de crear. Girando sobre sí mismo unas pocas vueltas, se mueve el fluido del órgano localizado en el oído interno, que ayuda al cerebro a mantener el sentido de la orientación y el equilibrio. Al parar, la

sensación de rotación prosigue con fuerza: nos da vueltas la cabeza. Se puede mirar fijamente un punto de la pared y convencerse a uno mismo, racionalmente, de que el mundo no está rotando. Sin embargo, por mucha que sea la convicción con que se vea que la pared se mantiene inmóvil, el movimiento se siente entre las propias percepciones. Uno se puede preguntar por qué el movimiento va, pongamos, en sentido contrario de las agujas del reloj y no en el sentido de las agujas del reloj, trazando una analogía directa con el problema de por qué siempre el tiempo fluye del pasado hacia el futuro. No parece haber firmes razones para suponer que el flujo del tiempo sea algo más que una ilusión producida por procesos cerebrales similares a la percepción de estar girando cuando nos da vueltas la cabeza.

Aceptar que el paso del tiempo es una ilusión no lo hace menos importante. Nuestras ilusiones, como nuestros sueños, constituyen una gran parte de la vida. Pueden no tener «realidad objetiva», pero ya hemos llegado a ver que semejante cosa es, como mínimo, una noción bastante vaga. Según la imagen estática del tiempo que se hace el físico, no debemos arrepentimos del pasado ni preocuparnos por el futuro. La muerte, por ejemplo, no merece mayor temor que el estado «anterior al nacimiento». Si no hay ningún cambio, la gente no muere en el estricto sentido de la palabra. Sólo hay fechas en que un individuo está vivo y consciente y otras fechas (antes de nacer, después de morir) en que no, y nadie puede ser consciente de la inconsciencia, pues sería una contradicción de términos. Puede

objetarse que sólo somos conscientes de un momento concreto y que ese momento avanza de manera inexorable, de modo que cuando se alcanza la muerte, todo se pierde y cesa la experiencia. No obstante, no es cierto que sólo seamos conscientes de un momento, ¡pues evidentemente somos conscientes de todos los momentos de que somos conscientes!

Replicar que sólo somos conscientes de un momento «cada vez» es una observación vacía, puesto que sin duda cada momento es distinto de todos los demás momentos. Nuestra experiencia no puede avanzar a lo largo de nuestra vida, puesto que cada momento de nuestra vida es experimentado. Cada momento de nuestra vida es considerado un «ahora» por el estado mental con que lo asociamos. No puede haber ningún «ahora» único ni ningún «presente» diferenciado, pues todos los momentos vividos son «ahoras» y todas las experiencias tienen carácter de «presente».

A pesar de la manifiesta verdad de todas estas observaciones, uno sigue quedándose con la profunda sensación insatisfactoria de que algo se le escapa. En realidad, el deseo de encontrar ingredientes adicionales, algo sobre lo que construir el flujo del tiempo y la existencia del ahora, ha constituido una epidemia de los físicos durante años. Unos han buscado la respuesta en la cosmología, otros en la teoría cuántica. En principio, la indeterminación de la teoría cuántica parece ofrecer una posibilidad, pues si el futuro sigue estando en el equilibrio del azar, quizás en algún sentido sea menos real que el presente y el pasado. Hay físicos que han

comparado la sensación del futuro naciente con la reducción de la superposición cuántica a realidad.

Desde un punto de vista superficial, parece prometedor, puesto que se sabe que el proceso de reducción es fundamentalmente asimétrico en el tiempo (es decir, es irreversible), de manera que comparte algunos rasgos con la memoria. Según esta opinión, el presente es un fenómeno real y representa el momento en que el mundo cambia de lo potencial a lo real, es decir, en que se descubre que el gato de Schrödinger está vivo o muerto, el momento decisivo en que se define una especie de presente. Estas ideas se han utilizado para defender la existencia del libre albedrío, una cuestión estrechamente vinculada con nuestra imagen de la realidad y de la naturaleza del tiempo. Si el futuro no está determinado, quizá nuestra mente pueda actuar sobre el mundo en el nivel cuántico e inclinar la balanza del azar en la dirección que elijamos.

El razonamiento viene a ser el siguiente: El cerebro opera mediante la ordenación de impulsos eléctricos y las corrientes eléctricas consisten en electrones que se mueven obedeciendo las leyes de la teoría cuántica, lo que significa que no se comportarán del todo «bien», sino que estarán sometidos a fluctuaciones aleatorias y a la indeterminación. Supongamos que exista, además del cerebro, una mente capaz de actuar en el nivel cuántico para decidir cuál de las muchas trayectorias posibles acabarán por seguir determinados electrones de crucial importancia.

Las leyes de la teoría cuántica no se transgreden, pues son posibles

muchas trayectorias; la mente sencillamente asegura que se realiza aquella que elige. De este modo, la mente organizaría los estados cerebrales de total acuerdo con las leyes de la física. Los estados cerebrales, por su parte, operan sobre el cuerpo, el cual manipula el medio ambiente, lo que permite que la mente obtenga el control del mundo material. Algunos investigadores han llegado a afirmar que han medido el efecto del pensamiento sobre los procesos cuánticos haciendo que un sujeto «desee» determinadas desintegraciones radiactivas en experimentos de percepción extrasensorial (ESP).

Estas ideas no soportan un examen auténtico. El hecho de que el futuro esté indeterminado no significa que necesariamente no exista, sino tan sólo que no se deduce servilmente del presente.

Además, el hecho de que consideremos el futuro indeterminado y el pasado concreto está estrechamente conectado al modo en que realmente llevamos a cabo los experimentos y ordenamos los resultados. Los experimentos de laboratorio conllevan preparación y análisis, además de la propia experimentación, y esta estructura impone de por sí a la interpretación de los resultados una asimetría entre el pasado y el futuro. En realidad, es posible llevar a cabo un conjunto de experimentos —hablando sin rigor— invertidos, en los que, en lugar de preparar un estado cuántico de partida y medir el resultado, se haga lo contrario: se reúne un cierto número de resultados y se deduce el estado inicial. Reflejando en el tiempo toda la estructura del experimento, haciendo preguntas distintas y analizando resultados diferentes, puede hacerse que lo

indeterminado sea el pasado en lugar del futuro. (En este esquema, las ramas de Everett se despliegan en el pasado en lugar de hacerlo en el futuro, de tal modo que los mundos se funden en vez de dividirse). De ahí se deduce que los diferentes papeles del pasado y del futuro en la indeterminación cuántica no son intrínsecos, sino que reflejan nuestras actitudes sobre lo que es relevante y la superestructura intelectual en que se encajan los resultados experimentales, la cual, a su vez, es función de la naturaleza fuertemente asimétrica del mundo, consecuencia de los procesos termodinámicos que ocurren a nuestro alrededor. De manera que, una vez más, la impresión de que el futuro «nace» parece ser una ilusión únicamente basada en el desequilibrio temporal del mundo y no en ningún efecto real debido al movimiento del tiempo ni al movimiento en el tiempo.

Aunque la indeterminación cuántica no parece ofrecer fundamento a ninguna explicación del flujo objetivo del tiempo, ni de la división del tiempo en pasado, presente y futuro, es concebible que aporte una explicación de la experiencia subjetiva del tiempo, caso de sostenerse la interpretación de Wigner de la teoría cuántica. Se recordará del capítulo 7 que Wigner proponía recurrir a la mente como el agente que reduce la superposición cuántica en forma de onda a realidad concreta. Se puede entonces razonar que la impresión mental del paso del tiempo se debe a la constante reducción cuántica que ocurre en la mente.

En cuanto a si la mente actúa a su vez sobre el cerebro cuántico

para decantar la balanza del azar, no hay ninguna prueba (al margen de los experimentos de ESP) que lo demuestre y sería necesario demostrar que los diminutos efectos cuánticos implicados se amplifican lo suficiente para producir señales en el nivel eléctrico utilizable por el cerebro. Aun cuando sea así, no está claro que eso suponga un libre albedrío ni siquiera que el libre albedrío tenga sentido, pues si se estima que la mente no es cuántica sino determinista y que decide manipular el cerebro para poner en marcha una determinada actividad, entonces hay que encontrar una justificación de por qué la mente se embarca en ese curso de acción. Puesto que el estado mental que inicia la acción está absolutamente determinado por los estados pasados de la mente y por las influencias procedentes del cerebro, la mente se reduciría a un mero autómata newtoniano, sin el menor control sobre sus propias acciones, siendo su actividad por completo consecuencia de los acontecimientos pasados y presentes.

Por otra parte, si la mente es indeterminada, a la manera de los sistemas cuánticos, entonces estará sometida a fluctuaciones aleatorias (caprichos descontrolados) y la arbitrariedad se inmiscuirá en sus decisiones. Ninguna alternativa parece estar próxima a la noción tradicional de libre albedrío. El único albedrío de verdad libre consistiría en que la mente pudiera alterar sus propios estados pasados, con lo que cambiaría el presente al mismo tiempo que el futuro. Sería en ese caso libre para construir el universo que quisiera, incluida ella misma, para luego demolerlo y

reconstruirlo otra vez, ad infinitum. Por supuesto, en la teoría de los múltiples universos de Everett, esto ocurre en un cierto sentido, pero la libertad de la voluntad es absolutamente ilusoria, puesto que todos los mundos posibles ocurren realmente y el entendimiento se divide repetidas veces para poblar un enorme número de ellos, imaginándose cada una de las mentes que gobierna su propio destino, cuando en realidad todos los destinos se realizan paralelamente. Aunque no existe ninguna prueba sólida de que la mente ni la voluntad del observador influyan en el universo material «cargando los dados» en el juego cuántico del azar, hay un cierto sentido en que el experimentador puede decidir el futuro. En el capítulo 6 se explicó que el experimentador, al elegir entre cierto número de magnitudes observables e incompatibles cuál de ellas medir, cambia las alternativas cuánticas que se ofrecen, si bien no puede imponer una opción. El ejemplo que examinamos con cierto detalle era el caso del polarizador y del fotón, que permite al experimentador crear un mundo en el que el fotón tenga una determinada polarización concreta, haciéndolo pasar por un polarizador. Otro ejemplo se refiere a la posición y el impulso de una partícula subatómica. Al elegir qué magnitud mide, el experimentador crea un mundo donde la posición o el impulso de la partícula tiene un valor bien determinado, aun cuando ese valor quede fuera de su control y sea una cuestión de azar. Se parece bastante a la suerte de poder escoger entre dos premios sorpresa, el primero en una bolsa con chocolates y el segundo en otra con

caramelos. Hay algo de azar y algo de elección. Es importante darse cuenta de que la facultad del experimentador cuántico de decidir el futuro, aunque limitada, supone una gran mejora con respecto a su contrapartida pre cuántica, que era la de un puro autómata arrastrado por la rueda del tiempo lo mismo que los engranajes de una máquina. No obstante, a pesar de esta capacidad, no hay ninguna razón para suponer que el futuro no exista ya, aun cuando todavía no esté determinado y aun cuando el observador tenga cierta mano en estructurarlo.

La última puntilla que remata la idea de que el futuro espera nacer la proporciona la teoría de la relatividad. Como ya hemos explicado, la simultaneidad de los acontecimientos alejados en el espacio es un concepto relativo, de manera que a todas luces carece de sentido pretender que sólo el presente es real, pues ¿al «presente» de quién nos referimos? La creencia de que el mundo exterior sólo existe «ahora» y que en el siguiente momento ha «cambiado» a una nueva condición y una nueva realidad, está absolutamente equivocada, pues no sólo no hay ningún mundo real «exterior», como demuestran los análisis de los procesos de medición cuántica, sino que dos observadores que se muevan el uno respecto al otro asignarán fechas completamente distintas a los mismos acontecimientos. Por ejemplo, dos personas que se cruzan paseando por la Tierra estarán en drástico desacuerdo sobre qué acontecimiento del lejano quásar 3C273 ocurre simultáneamente con su encuentro. La discrepancia asciende a miles de años. Cada

uno de ellos puede afirmar la realidad, en ese momento, de su acontecimiento en el quásar, pero es evidente que esta afirmación es absurda, pudiéndose ajustar el presente a voluntad: basta simplemente con levantarse del asiento y darse un paseo para pasar miles de años de «realidad» del quásar 3C273. Un acontecimiento «presente» puede proyectarse de repente al futuro o al pasado, y luego recuperarse por el sencillo procedimiento de andar un poco. De forma similar, los extraterrestres sedentarios estarán en desacuerdo con sus colegas ambulantes sobre si en la Tierra es «realmente» el año 1980 o si es el año 5780. Cada cual pensará que el acontecimiento de su elección ocurre «ahora» y, por tanto, es real, mientras que el otro está equivocado. Ninguno tiene razón, pues no hay presente universal ni realidad universal.

Sería estimulante identificar los procesos cerebrales concretos responsables de la sensación del flujo temporal: parece probable que estén íntimamente relacionados con los procesos de la memoria, que también es muy asimétrica en el tiempo. Recordamos el pasado y no el futuro, de manera que el tiempo está dotado de una especie de desequilibrio mental, y si no tuviéramos memoria la conciencia desaparecería junto con el flujo del tiempo. No me refiero ahora al estado de amnesia, que sólo afecta a la memoria a largo plazo, sino a un estado en el que no se recuerde nada en absoluto, por reciente que sea. En tal condición debe haber una absoluta imposibilidad de dar ningún sentido al entorno, pues la información sensorial se reduciría a una masa de impresiones momentáneas, sin

significación ni coherencia, y toda actividad planeada se haría imposible, pues uno sería incapaz de recordar de un minuto al siguiente lo que estaba haciendo ni cómo era el mundo circundante. La memoria, al menos a corto plazo, es una parte indispensable del proceso perceptivo, puesto que la percepción consiste en organizar las impresiones sensoriales según conocimientos y expectativas anteriores, de tal modo que los acontecimientos se pongan en mutua relación y nuestra propia existencia se vincule al mundo que nos rodea.

Podría objetarse que explicar el flujo del tiempo en función de la memoria sólo sustituye un misterio por otro, pues debemos tener en cuenta el hecho de que sólo se recuerda el pasado y no el futuro.

¿Cuál es el origen de la asimetría entre pasado y futuro? Por suerte, aquí nos encontramos en terreno más firme, porque las relaciones entre pasado y futuro no son verbales y, por tanto, es posible examinarlas dentro del entramado de las leyes conocidas de la física. A todo nuestro alrededor hay procesos que presentan una fuerte asimetría entre pasado y futuro. Uno de ellos ya lo hemos mencionado, a saber, la inexorable desintegración del orden. La segunda ley de la termodinámica afirma que el caos global del universo va en aumento, de manera que la acumulación de orden en un lugar debe pagarse con una mayor cantidad de desorden compensatorio en algún otro. Así, la acumulación de información de nuestra memoria se logra al coste de una gran cantidad de metabolismo corporal: el funcionamiento de los órganos sensoriales,

la transferencia y procesamiento de los datos recibidos, la localización de los adecuados servicios de almacenaje cerebrales y, por último, la reorganización electroquímica de las células cerebrales para registrar los datos recién adquiridos. Todas estas operaciones deben ser impulsadas por el cuerpo mediante la utilización de la energía extraída de los alimentos, lo que constituye una irreversible disipación de la energía organizada en calor corporal según el principio general mencionado en la pág. 197. En conclusión, la memoria no es un fenómeno especialmente misterioso y la poseen sistemas distintos del humano, por ejemplo, las arañas y las computadoras. Las bibliotecas y otros archivos inanimados del pasado, como los fósiles, son ejemplos de memoria en sentido amplio. Todo obedece a la segunda ley de la termodinámica, fundamentalmente asimétrica en el tiempo, de manera que todo otorga al mundo un desequilibrio entre pasado y futuro que en nuestra mente parece estar movido por una estructura más elaborada del tiempo que fluye desde el pasado hacia el futuro.

Por supuesto, nos rodean otros muchos fenómenos al parecer irreversibles que contribuyen al desequilibrio del mundo o asimetría del tiempo. Por poner unos cuantos ejemplos tomados al azar: las personas envejecen, los edificios se derrumban, las montañas se erosionan, las estrellas se consumen, el universo se expande, los huevos se rompen, las ondas de agua se extienden a partir del centro de la perturbación, las ondas de radio llegan después de ser

enviadas, el perfume se evapora de los frascos abiertos, los relojes se paran. En todos estos casos nunca encontramos los acontecimientos en orden inverso, nunca los relojes se dan cuerda solos ni los mensajes de radio llegan antes de ser enviados.

Es importante subrayar que estos fenómenos no determinan el pasado ni el futuro, que yo he sostenido que carecen de significación, sino que señalan cuáles acontecimientos son anteriores o posteriores a otros acontecimientos. Así, por ejemplo, si tomamos una película cinematográfica de un huevo que cae al suelo y se rompe, no tenemos ninguna duda de qué extremo de la película representa el acontecimiento primero, pues en el mundo real los huevos no se reconstituyen espontáneamente: la rotura del huevo es irreversible.

Un estudio meticuloso revela que la mayor parte de los procesos irreversibles que nos rodean pueden describirse mediante la ley general del aumento del desorden, es decir, mediante la llamada segunda ley de la termodinámica, a que nos hemos referido en repetidas ocasiones.

En ciertos casos, como en el del huevo que se rompe, el perfume que se evapora, la montaña que se erosiona o las casas que se derrumban, el crecimiento del desorden es evidente. En otros casos es más sutil. El reloj que se para colabora al desorden general del mundo puesto que su actividad organizada —las vueltas coordinadas de ruedas y manecillas— se desintegra en una actividad desorganizada, como la energía almacenada en el mecanismo

impulsor se disipa gradualmente en calor por la materia del reloj. La energía originalmente almacenada en la cuerda acaba en movimientos atómicos aleatorios y no en el movimiento coordinado de las ruedas.

Durante mucho tiempo ha sido un misterio por qué nuestro mundo es asimétrico en el tiempo. ¿Por qué el orden siempre cede el paso al desorden? Quizá nos ayude a comprender esta tendencia tan general volver al ejemplo de la baraja de cartas. Si inicialmente se colocan las cartas en orden y se baraja al azar, lo abrumadoramente probable es que, tras ser barajadas, acaben en un estado de gran desorden. Las probabilidades de que quien baraja reconstituya exactamente el orden correcto al final no son cero, pero sí increíblemente pequeñas.

En muchos procesos naturales tiene lugar una especie de barajado como consecuencia de las colisiones moleculares internas, tal como hemos explicado en el capítulo anterior. Una buena analogía con la baraja de cartas es el ejemplo de la botella de perfume destapada.

Al principio el perfume, como las cartas, está en una condición muy ordenada, es decir, encerrado en la botella. Debido al choque de los impactos de las moléculas de aire que lo rodean, el perfume se evapora gradualmente, como si sus propias moléculas fueran lanzadas de la superficie del líquido y se desperdigaran por todas partes, impulsadas por el incesante bombardeo de las moléculas de aire. Al final, el revoltijo es total y el perfume se extiende de forma irrecuperable por la atmósfera, con sus moléculas caóticamente

mezcladas con las del aire. El efecto barajador, pues, ha consistido en convertir lo que en principio era el estado ordenado del perfume en una situación muy desordenada, al parecer irreversible.

La tendencia del orden a transformarse irreversiblemente en desorden presenta una paradoja: puesto que sabemos que las colisiones entre las moléculas son todas reversibles, no se transgrediría ninguna ley fundamental de la física si el perfume regresara espontáneamente al interior del frasco; sin embargo tal suceso lo consideraríamos un milagro. Si cuando dos moléculas chocan y rebotan mutuamente pudiéramos, mediante algún artilugio, interceptarlas y hacerlas regresar exactamente por las mismas trayectorias, volverían a rebotar a su posición original. Si se hiciera esto mismo simultáneamente con todas las moléculas del perfume y del aire, todo el sistema regresaría de nuevo a su posición original, como en una película pasada al revés, hasta que el perfume se depositara en la botella. La posibilidad de este milagroso giro de los acontecimientos también es evidente en el caso de las cartas barajadas, pues si continuáramos barajando sin cesar tarde o temprano lograríamos poner la baraja en el orden original. El tiempo necesario sería inmenso, pero, basándonos exclusivamente en las leyes probabilísticas, barajar al azar debe en último término producir todos los órdenes posibles, incluido el orden original.

Del mismo modo, los choques entre las moléculas producirán finalmente un estado ordenado otra vez, contando, claro está, con que la habitación sea estanca para evitar que el perfume escape.

La paradoja es ¿por qué, si la transición del orden al desorden y la inversa son igualmente posibles, siempre encontramos que el perfume se evapora en la habitación, los montes se erosionan, el hielo se deshace al calentarlo, las estrellas se consumen, los castillos de arenas son arrastrados por la marea, etc., etc.? Para resolver la paradoja debemos preguntarnos en cada uno de los casos cómo se ha logrado en un principio el estado de orden, es decir, ¿cómo se colocó originalmente el perfume dentro del frasco? No, cabe suponer, por el procedimiento de que alguien abrió la botella en una habitación llena de perfume y esperó la inmensidad de tiempo necesario para que se reuniera en el receptáculo por azar; ésa sería una estrategia tan insuficiente como la del pescador que abre un cesto junto al río y espera a que un pez salte dentro.

En el mundo real, los estados ordenados se seleccionan, de entrada, de nuestro medio ambiente, no se constituyen por azar. El mundo que nos rodea abunda en estructuras ordenadas, muchas de las cuales se deben, en el caso de la Tierra, a la proximidad al Sol, que impulsa buena parte de la actividad organizada que hay en la superficie terrestre. El Sol, y las estrellas en general, son los ejemplos supremos de materia y energía organizadas del universo. Conforme pasa el tiempo, la energía ordenada que se encuentra encerrada en su interior se va disipando en el exterior mientras las estrellas consumen su combustible y desperdigan la energía por todo el cosmos en forma de luz y calor. Las estrellas se consumen y el universo, como un gigantesco reloj, va lentamente parándose.

Incluso a escala cósmica, el orden se descompone inexorablemente en el desorden por miles de millones de procedimientos distintos.

La simetría entre el pasado y el futuro, enraizada como está en la tendencia unilateral del orden a desintegrarse en el caos, tiene pues un origen cosmológico. Para explicar de dónde procede el orden último del cosmos, y a partir de ahí explicar la distinción entre pasado y futuro, es necesario examinar la creación del universo: el Big Bang. La estructura cósmica que surgió del horno primigenio estaba muy ordenada y toda la actividad posterior del universo ha consistido en consumir este orden y disiparlo. Todavía queda mucho, pero no puede durar siempre. El orden que impulsa al Sol y a las estrellas, tan vitales para la vida del universo, puede rastrearse en los procesos nucleares que aseguraron que el cosmos naciente estuviese compuesto fundamentalmente de elementos ligeros, como el hidrógeno y el helio, característica ésta causada por la rapidez de la expansión primigenia que no dio materialmente tiempo al cosmos para cocer elementos más pesados en las primeras etapas. También depende de la relativa uniformidad de la materia cósmica, que permitió evitar la proliferación de agujeros negros inmediatamente después del Big Bang. De manera que, una vez más, descubrimos cuán delicadamente depende la vida del universo, y nuestra existencia en tanto que espectadores, de la adecuada estructura cósmica, a saber, una estructura que permite una tajante distinción entre el pasado y el futuro basada en el orden primigenio: un orden que alcanza su pináculo de complejidad en la

materia viva.

La íntima conexión existente entre nuestra propia existencia, la asimetría temporal del mundo que nos rodea y el orden cósmico inicial debe contemplarse en el contexto del superespacio. Ya hemos visto que el cosmos ordenado sólo es una pequeñísima fracción de todos los muchos mundos posibles. Entre los demás universos, los hay en que reina el desorden en todas partes y también los hay que partieron de un estado de desorden y luego progresan hacia el orden. En tales mundos, el tiempo «corre hacia atrás» en relación con nuestro propio mundo, pero si están habitados por observadores, cabe suponer que los cerebros de éstos también estarán sometidos a un funcionamiento inverso, de tal modo que su percepción de sus universos se diferenciará poco de nuestra percepción del nuestro (aunque lo verán contrayéndose en lugar de expandiéndose).

Cuando se examinan las ecuaciones del desarrollo cuántico del superespacio, se encuentra que son reversibles: no distinguen el pasado del futuro. En el superespacio no hay diferencia entre pasado y futuro. Sin duda algunos mundos tienen muy marcada la dualidad pasado-futuro y esos son precisamente los que pueden albergar vida. Otros tienen la asimetría pasado-futuro invertida y, es de suponer, también están habitados. No obstante, en la inmensa mayoría no hay ninguna diferencia especial entre el pasado y el futuro, de modo que son absolutamente inadecuados para la vida y pasan sin que nadie los perciba. En la teoría de Everett, todos esos

otros mundos, incluyendo los de tiempo invertido, existen realmente junto al nuestro. En la teoría más convencional son mundos posibles que, por una increíble buena fortuna, no alcanzan la existencia, aunque pueden existir en el futuro remoto y en otra parte del universo. Pudiera ser que nuestro propio mundo, agradable y muy ordenado, sea simplemente una burbuja local de uniformidad en medio de un cosmos predominantemente caótico, y que sólo nosotros vemos, porque nuestra misma existencia depende de las benignas condiciones que aquí se dan.

En este capítulo, el modelo físico del tiempo se ha contrapuesto al de nuestra experiencia personal, que está repleta de imágenes psicológicas fantásticas y paradójicas. La zona oscura entre la mente y la materia, entre la filosofía y la ciencia, entre la psicología y el mundo objetivo, sólo es el umbral de la exploración, pero ninguna descripción definitiva de la realidad puede omitirla. Pudiera ser que las imágenes del tiempo que nos son tan caras —la existencia del momento presente, el paso del tiempo, el libre albedrío y la inexistencia del futuro, el uso de los tiempos verbales en el lenguaje— hubiera que llegar a verlas como tan sólo primitivas supersticiones nacidas de una incorrecta comprensión del mundo físico. Quizá nuestros descendientes no hagan ningún uso de semejantes conceptos, en cuyo caso cabe imaginarse que organizarán su vida de forma muy distinta a la nuestra.

Es posible que las comunidades avanzadas de otras partes del universo hayan abandonado hace mucho tiempo las nociones de

que el tiempo pasa o bien de que las cosas cambian, o de que hay un único presente que avanza hacia un futuro incierto. Sólo podemos conjeturar sobre el impacto que tal abandono tendría en su comportamiento y en su pensamiento, pues sin expectativas, sin remordimientos, sin miedo, sin previsiones, sin alivio, sin impaciencia y sin todas las demás emociones vinculadas al tiempo que sentimos, su concepción del mundo bien podría resultarnos incomprensible. Es probable que, caso de encontrar tales seres, no supiéramos comunicar casi nada con sentido para ambas partes. O bien pudiera ser que, por una vez, nuestra mente fuese más digna de confianza que nuestros instrumentos de laboratorio y que el tiempo tuviera en realidad esa estructura más rica que percibimos. En cuyo caso, la naturaleza de la realidad, del tiempo, del espacio, de la mente y de la materia sufriría una revolución de una profundidad sin precedentes. Ambas perspectivas son pavorosas.

El autor

Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres. Es autor de numerosos trabajos de investigación y libros de divulgación científica, entre los que destacan *El Universo desbocado, Super Fuerza, La frontera del infinito, Dios y la nueva física, El Universo accidental* y *En busca de las ondas de gravitación.*

F I N