

Leonard Susskind

La guerra de los agujeros negros

Una controversia científica sobre las leyes
últimas de la Naturaleza



2009

Reseña

¿Qué sucede cuando algo cae en un agujero negro? ¡Desaparece! Es lo que afirmó hace treinta años un joven físico llamado Stephen Hawking suscitando un fecundísimo debate sobre las leyes fundamentales del universo. Leonard Susskind, padre de la teoría de cuerdas y uno de los físicos más eminentes de nuestro tiempo, y Gerard 't Hooft, premio Nobel de Física en 1999, conscientes del gran reto que implicaba la propuesta de Hawking, fiel a la teoría de la relatividad general, contraatacaron con las leyes de la mecánica cuántica en la mano.

La guerra de los agujeros negros no es, simplemente, la historia de aquel enfrentamiento —por mucho que en el libro se explique con gran brillantez y sentido del humor— entre los más grandes científicos de nuestro tiempo. En realidad, lo que nos transmite es la tensión intelectual permanente de estos sabios y el esfuerzo que realizaron para aparcar momentáneamente sus más firmes convicciones y tratar de reconciliar ambas teorías para progresar hacia la construcción de una teoría cuántica de la gravedad y llegar a desentrañar, algún día, las incógnitas últimas del universo.

Índice

[Introducción](#)

Primera parte: Se forma la tormenta

1. [El primer disparo](#)
2. [La estrella oscura](#)
3. [No es la geometría de su abuelo](#)
4. [«Einstein, no le digas a Dios lo que tiene que hacer»](#)
5. [Planck inventa un patrón de medida mejor](#)
6. [En un bar de Broadway](#)
7. [Energía y entropía](#)
8. [Los chicos de Wheeler, o ¿cuánta información se puede acumular en un agujero negro?](#)
9. [Luz negra](#)

Segunda parte: Ataque sorpresa

10. [Cómo perdió Stephen sus bits y no supo dónde encontrarlos](#)
11. [La resistencia danesa](#)
12. [¿A quién le importa?](#)
13. [Jaque ahogado](#)
14. [Escaramuza en Aspen](#)

Tercera parte: Contraataque

15. [La batalla de Santa Bárbara](#)
16. [¡Espere! Invierta el recableado](#)
17. [Ahab en Cambridge](#)
18. [El mundo como un holograma](#)

Cuarta parte: Se cierra el círculo

19. [Arma de deducción masiva](#)
20. [El avión de Alicia, o la última hélice visible](#)
21. [Contando agujeros negros](#)
22. [América del Sur gana la guerra](#)
23. [¿Física nuclear? ¡Estás dando a luz!](#)
24. [Humildad](#)

[Epílogo](#)

[Agradecimientos](#)

[Glosario](#)

[Sobre el autor](#)

Introducción

Había tanto que grokar, y tan poco de lo que grokar.

ROBERT A. HEINLEIN

Extranjero en una tierra extraña

En algún lugar de la sabana del África Oriental, un viejo león espía a su presunta cena. Él prefiere víctimas más viejas y más lentas, pero ahora no tiene otra elección que un antílope joven y sano. Los ojos vigilantes de la presa están situados en los lados de su cabeza, idealmente adaptados para explorar el paisaje en busca de predadores peligrosos. Los ojos del predador miran de frente; son perfectos para localizar a su víctima y calibrar la distancia. Esta vez las exploraciones panorámicas del antílope no han detectado al predador, y éste lo tiene a su alcance. Las potentes patas traseras del león lo impulsan hacia la víctima aterrada. La interminable carrera empieza de nuevo. Aunque cargado por la edad, el gran felino es un velocista superior. Al principio la distancia se estrecha, pero los potentes músculos del león ceden ante la falta de oxígeno. Pronto se impone la resistencia natural del antílope, y la velocidad relativa entre el felino y su presa cambia de signo; la distancia empieza a abrirse. En el momento que siente que su suerte ha cambiado, Su Alteza Real está derrotada. Se vuelve lentamente a la maleza.

* * * *

Cincuenta mil años atrás, un cazador cansado detecta la abertura de una cueva bloqueada por una roca: sería un lugar seguro para descansar si pudiera mover el pesado obstáculo. A diferencia de sus antecesores primates, el cazador camina erecto. Con su postura erguida empuja con fuerza la piedra, pero nada sucede. Para conseguir un ángulo mejor, el cazador separa los pies de la roca. Cuando su cuerpo está casi horizontal, la fuerza aplicada tiene una componente mucho mayor en la dirección correcta. La roca se mueve.

* * * *

¿Distancia? ¿Velocidad? ¿Cambio de signo? ¿Ángulo? ¿Fuerza? ¿Componente? ¿Qué cálculos increíblemente sofisticados tuvieron lugar en el cerebro del cazador, y ya no digamos en el del felino? Aquéllos son conceptos técnicos que uno encuentra por primera vez en los libros de texto de física universitaria. ¿Dónde aprendió el león a calibrar no sólo la velocidad de su presa sino también, lo que es más importante, la velocidad relativa? ¿Hizo el cazador un curso de física para aprender el concepto de fuerza? ¿Y un curso de trigonometría para obtener los senos y los cosenos para calcular las componentes?

Lo cierto es que todas las formas de vida complejas tienen incorporados conceptos físicos instintivos que han sido cableados en su sistema nervioso por la evolución¹. Sin este *software* físico

¹ Nadie sabe cuánto está cableado y cuánto se aprende a una edad temprana, pero la distinción no es importante aquí. Lo importante es que para cuando nuestro sistema nervioso está maduro, la experiencia, ya sea personal o evolutiva, nos ha dado mucho conocimiento instintivo del funcionamiento del mundo físico. Esté cableado o se aprenda a una edad muy temprana, el conocimiento es muy difícil de olvidar.

preprogramado, la supervivencia sería imposible. Las mutaciones y la selección natural nos han hecho físicos a todos, incluso a los animales. En los hombres el gran tamaño del cerebro ha permitido que estos instintos evolucionen hasta conceptos que llevamos en el nivel consciente.

Nos recableamos

De hecho, todos somos físicos *clásicos*². Sentimos la fuerza, la velocidad y la aceleración en un nivel visceral. En la novela de ciencia ficción *Extranjero en una tierra extraña* (1961), Robert Heinlein inventó una palabra para expresar este tipo de comprensión profundamente intuitiva, casi visceral, de un fenómeno: *grok*³. Yo grok la fuerza, la velocidad y la aceleración. Grok el espacio tridimensional. Grok el tiempo y el número 5 🎲. Las trayectorias de una piedra o de una lanza son grokables. Pero mi grokador estándar incorporado deja de ser válido cuando trato de aplicarlo al espacio-tiempo decadimensional, o al número 10^{1000} o, todavía peor, al mundo de los electrones y al principio de incertidumbre de Heisenberg.

Al comienzo del siglo XX la intuición quedó hecha añicos; fenómenos totalmente desconocidos sembraron desconcierto en la física. Mi abuelo paterno tenía diez años cuando Albert Michelson y Edward Morley descubrieron que el movimiento orbital de la Tierra

² La palabra *clásica* se refiere a la física que no requiere las consideraciones de la mecánica cuántica.

³ *Grok* significa entender perfecta e intuitivamente

a través del hipotético éter no era detectable⁴. Era veinteañero cuando se descubrió el electrón; tenía treinta años cuando Albert Einstein publicó la teoría de la relatividad especial, y ya estaba bien entrado en la madurez cuando Heisenberg descubrió el principio de incertidumbre. Es imposible que la presión evolutiva pudiera haber creado una comprensión instintiva de estos mundos radicalmente diferentes. Pero algo en nuestras redes neurales, al menos en algunos de nosotros, nos ha preparado para un fantástico recableado que nos permite no sólo preguntar sobre estos oscuros fenómenos, sino crear abstracciones matemáticas —nuevos conceptos muy poco intuitivos— para manejarlos y explicarlos.

La primera necesidad de recablear fue debida a la velocidad: una velocidad tan rápida que casi rivalizaba con la velocidad de un rayo de luz evanescente. Ningún animal se había movido a más de 200 kilómetros por hora antes del siglo XX, e incluso hoy la luz viaja tan rápida que, para cualquier fin, salvo los científicos, no viaja en absoluto: simplemente aparece de forma instantánea cuando se encienden las luces. Los humanos primitivos no tenían necesidad de circuitos cableados adaptados a las velocidades ultraaltas como la de la luz.

El recableado para la velocidad sucedió de repente. Einstein no era un mutante; había luchado en la oscuridad durante una década para sustituir su viejo cableado newtoniano. Pero a los físicos de la época debió parecerles que entre ellos había aparecido

⁴ El famoso experimento de Michelson y Morley fue el primero en mostrar que la velocidad de la luz no depende del movimiento de la Tierra. Llevó a las paradojas que Einstein resolvió finalmente en la teoría de la relatividad especial.

espontáneamente un nuevo tipo de ser humano: alguien que podía ver el mundo no en términos del espacio tridimensional, sino en términos de un espacio-tiempo tetradimensional. Einstein luchó durante otra década —esta vez a la vista de los físicos— para unificar lo que él había llamado relatividad especial con la teoría de la gravedad de Newton. Lo que emergió, la teoría de la relatividad general, cambió profundamente todas las ideas tradicionales sobre geometría. El espacio-tiempo se hizo flexible, curvo o alabeado. Respondía a la existencia de materia casi como una lámina elástica bajo tensión. Previamente el espacio-tiempo había sido pasivo, con propiedades geométricas fijas. En la Teoría General, el espacio-tiempo se convertía en un actor activo: podía ser deformado por objetos masivos como planetas y estrellas, pero no podía ser visualizado, al menos no sin un montón de matemáticas adicionales.

En 1900, cinco años antes de que Einstein entrara en escena, se inició otro cambio de paradigma mucho más extraño con el descubrimiento de que la luz está compuesta de partículas llamadas fotones, o a veces cuantos de luz. La teoría del fotón⁵ para la luz era sólo un indicio de la revolución que se avecinaba; la gimnasia mental iba a ser mucho más abstracta que cualquier cosa vista hasta entonces. La mecánica cuántica era más que una nueva ley de la Naturaleza. Suponía cambiar las reglas de la lógica clásica, las reglas ordinarias de pensamiento que toda persona cuerda utiliza para hacer deducciones. Parecía descabellada, pero, descabellada o

⁵ El término *fotón* no se utilizó hasta 1926, cuando lo acuñó el químico Gilbert Lewis

no, los físicos fueron capaces de recablearse con una nueva lógica llamada lógica cuántica. En el capítulo 4 explicaré todo lo que usted necesita saber sobre mecánica cuántica. Prepárese para quedar desconcertado. Todo el mundo lo está.

La relatividad y la mecánica cuántica han sido compañeras reacias desde el principio. En cuanto fueron unidas en una boda forzosa estalló la violencia: las matemáticas dejaban escapar furiosos infinitos por cada pregunta que pudiera hacer un físico. Se necesitó medio siglo para reconciliar la mecánica cuántica y la relatividad especial, pero finalmente se eliminaron las inconsistencias matemáticas. A comienzos de los años cincuenta, Richard Feynman, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga y Freeman Dyson⁶ habían establecido la base para una síntesis de la relatividad *especial* y la mecánica cuántica llamada teoría cuántica de campos. Pero la teoría de la relatividad *general* (la síntesis de Einstein de la relatividad especial y la teoría de la gravedad de Newton) y la mecánica cuántica seguían siendo irreconciliables, y no precisamente por falta de intentos. Feynman, Steven Weinberg, Bryce DeWitt y John Wheeler intentaron «cuantizar» las ecuaciones de la gravedad de Einstein, pero todo lo que salía era cháchara matemática. Quizá eso no fuera sorprendente. La mecánica cuántica gobernaba el mundo de los objetos muy livianos. La gravedad, por el contrario, parecía importante sólo para aglomerados muy pesados de materia. Parecía seguro suponer que

⁶ En 1965 Feynman, Schwinger y Tomonaga recibieron el premio Nobel por su trabajo. Pero la moderna forma de pensar sobre la teoría cuántica de campos debe tanto a Dyson como a ellos.

nada era suficientemente liviano para que la mecánica cuántica fuera importante ni suficientemente pesado para que la gravedad fuera importante. Como resultado, muchos físicos a lo largo de la segunda mitad del siglo XX consideraban que la búsqueda de semejante teoría unificada era inútil, apta sólo para charlatanes y filósofos.

Pero otros pensaban que esto era una visión miope. Para ellos la idea de dos teorías de la Naturaleza incompatibles, incluso contradictorias, era intelectualmente intolerable. Creían que la gravedad desempeñaba casi con certeza un papel en determinar las propiedades de los más pequeños bloques constituyentes de la materia. El problema era que los físicos no habían sondeado a suficiente profundidad. De hecho, tenían razón: en los cimientos del mundo, donde las distancias son demasiado pequeñas para ser observadas directamente, los más pequeños objetos de la Naturaleza ejercen poderosas fuerzas gravitatorias unos sobre otros.

Hoy día se acepta generalmente que la gravedad y la mecánica cuántica desempeñarán papeles igualmente importantes para determinar las leyes de las partículas elementales. Pero el tamaño de los bloques constituyentes básicos de la Naturaleza es tan inconcebiblemente pequeño que nadie debería sorprenderse si fuera necesario un recableado radical para entenderlos. El nuevo cableado, sea cual sea, se denominará *gravedad cuántica*, pero incluso sin conocer su forma detallada, podemos afirmar con certeza que el nuevo paradigma implicará conceptos muy poco familiares de espacio y tiempo. La realidad objetiva de puntos de

espacio e instantes de tiempo está haciendo aguas, siguiendo el camino de la simultaneidad⁷, el determinismo⁸ y el dodo. La gravedad cuántica describe una realidad mucho más subjetiva de lo que nunca imaginamos. Como veremos en el capítulo 18, es una realidad que en muchos aspectos se parece a la ilusión tridimensional arrojada por un holograma.

Los físicos teóricos están luchando por poner pie firme en una tierra extraña. Como en el pasado, los experimentos mentales han sacado a la luz paradojas y conflictos entre principios fundamentales. Este libro trata de una batalla intelectual acerca de un simple experimento mental. En 1976 Stephen Hawking imaginó que se arrojaba un trozo de información —un libro, un ordenador, incluso una partícula elemental— dentro de un agujero negro. Hawking creía que los agujeros negros eran las trampas definitivas, y el trozo de información se perdería de forma irrecuperable para el mundo exterior. Esta observación aparentemente inocente no lo era en absoluto tanto como parece; amenazaba con minar y derribar el edificio entero de la física moderna. Algo estaba terriblemente equivocado; la ley de la Naturaleza más básica —la conservación de la información— estaba en serio peligro. Para quienes prestaron atención, o bien Hawking estaba equivocado o el tricentenario centro de la física no se sostenía. Al principio muy pocas personas prestaron atención. Durante casi dos décadas la controversia se

⁷ Una de las primeras cosas que desaparecieron con la revolución de la relatividad en 1905 fue la idea de que dos sucesos pueden ser objetivamente simultáneos.

⁸ El determinismo es el principio según el cual el futuro está completamente determinado por el pasado. Según la mecánica cuántica las leyes de la física son estadísticas y nada puede predecirse con certeza.

mantuvo en general por debajo del alcance del radar. El gran físico danés Gerard 't Hooft y yo éramos un ejército de dos combatientes, a un lado de la divisoria intelectual. Stephen Hawking y un pequeño ejército de relativistas estaban en el bando contrario. Sólo a comienzos de los años noventa muchos físicos teóricos — especialmente teóricos de cuerdas— se dieron cuenta de la amenaza que Hawking había planteado, y entonces la mayoría de ellos la consideraron errónea. Al menos errónea durante un tiempo.

La guerra de los agujeros negros era una controversia científica genuina; no se parecía en nada a los pseudodebates sobre el diseño inteligente o la existencia del calentamiento global. Estas discusiones espurias, amañadas por manipuladores políticos para confundir a un público ingenuo, no reflejan ninguna diferencia real entre opiniones científicas. Por el contrario, la división sobre los agujeros negros era muy real. Físicos teóricos eminentes no podían estar de acuerdo en qué principios de la física había que conservar y cuáles había que abandonar. ¿Debían seguir a Hawking, con sus visiones conservadoras del espacio-tiempo, o a 't Hooft y a mí, con nuestras visiones conservadoras de la mecánica cuántica? Ambos puntos de vista parecían llevar a paradojas y contradicciones. O bien el espacio-tiempo —el escenario en el que se representan las leyes de la Naturaleza— no podía ser lo que pensábamos que era, o los venerables principios de la entropía y la información eran erróneos. Millones de años de evolución cognitiva, y doscientos años de experiencia en física, nos habían engañado una vez más, y nos encontrábamos con necesidad de un nuevo cableado mental.

La guerra de los agujeros negros es una celebración de la mente humana y su extraordinaria capacidad para descubrir las leyes de la Naturaleza. Es una exploración de un mundo mucho más alejado de nuestros sentidos que la mecánica cuántica y la relatividad. La gravedad cuántica trata con objetos cien trillones de veces más pequeños que un protón. Nunca hemos tenido experiencia directa de cosas tan pequeñas, y probablemente nunca la tendremos, pero el ingenio humano nos ha permitido deducir su existencia y, sorprendentemente, los portales a dicho mundo son objetos de enorme masa y tamaño: los agujeros negros.

La guerra de los agujeros negros es también la crónica de un descubrimiento. El principio holográfico es una de las abstracciones menos intuitivas de toda la física. Fue la culminación de más de dos décadas de un estado de guerra intelectual sobre el destino de la información que cae dentro de un agujero negro. No fue una guerra entre enemigos encarnizados; de hecho, los participantes principales son amigos. Pero fue una fiera batalla intelectual entre personas que se respetaban profundamente pero también discrepaban profundamente.

Hay una opinión extendida que debe ser rechazada. La imagen pública de los físicos, especialmente la de los físicos teóricos, suele ser la de personas cerradas y rígidas cuyos intereses son ajenos, no humanos y aburridos. Nada podía estar más lejos de la verdad. Los grandes físicos que he conocido, y son muchos, son personas extraordinariamente carismáticas con fuertes pasiones y mentes fascinantes. La diversidad de personalidades y formas de pensar

tiene para mí un interés sin límites. En mi opinión, escribir sobre física para una audiencia general sin incluir el elemento humano es dejar fuera algo interesante. Al escribir este libro, he tratado de captar la parte emocional de la historia tanto como la científica.

Una nota sobre números grandes y números pequeños

A lo largo de este libro usted encontrará muchos números muy grandes y muy pequeños. El cerebro humano no fue construido para visualizar números mucho mayores que 100 o mucho más pequeños que $1/100$, pero podemos entrenarnos para hacerlo mejor. Por ejemplo, estando muy acostumbrado a tratar con números, yo puedo imaginar más o menos un millón, pero la diferencia entre un billón y un trillón está más allá de mis poderes de visualización. Muchos de los números de este libro son superiores a los billones y trillones. ¿Cómo podemos manejarlos? La respuesta implica una de las mayores hazañas de recableado de todos los tiempos: la invención de los exponentes y de la notación científica.

Empecemos con un número bastante grande. La población de la Tierra es de unos 6000 millones. Mil millones es 10 multiplicado nueve veces por sí mismo. También puede expresarse como un 1 seguido de nueve ceros.

$$\text{Mil millones} = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 1.000.000.000.$$

Una notación abreviada para 10 multiplicado nueve veces por sí mismo es 10^9 , o diez elevado a la novena potencia. Así, la población de la Tierra viene dada aproximadamente por esta ecuación:

$$\text{Seis mil millones} = 6 \times 10^9.$$

En este caso, se dice que 9 es el exponente.

He aquí un número mucho mayor: el número total de protones y neutrones en la Tierra.

Número de protones y neutrones en la Tierra (aproximadamente) = 5×10^{51} .

Éste es obviamente mucho mayor que el número de personas en la Tierra. ¿Cuánto mayor? Diez elevado a la potencia cincuenta y uno tiene 51 factores de diez, pero mil millones tiene sólo 9. De modo que 10^{51} tiene 42 números factores más de diez que 10^9 . Esto hace el número de partículas nucleares en la Tierra unas 10^{42} veces mayor que el número de personas. (He ignorado los factores 5 y 6 en las ecuaciones anteriores. 5 y 6 no son muy diferentes uno de otro, de modo que si uno quiere un «orden de magnitud estimado», puede ignorarlos).

Tomemos dos números realmente grandes. El número total de electrones en la porción del universo que podemos ver con los telescopios más potentes es de unos 10^{80} . El número total de fotones⁹ es de unos 10^{90} . 10^{90} quizá no suena mucho mayor que

⁹ No hay que confundir fotones con protones. Los *fotones* son partículas de luz. Los *protones*, junto con los neutrones, constituyen el núcleo atómico.

10^{80} , pero eso es engañoso: 10^{90} es 10^{10} veces mayor, y 10.000.000.000 es un número muy grande. De hecho, 10^{80} y 10^{81} parecen casi iguales, pero el segundo es 10 veces mayor que el primero. Por eso, un cambio modesto en el exponente puede significar un cambio enorme en el número que representa. Consideremos ahora números muy pequeños. El tamaño de un átomo es de aproximadamente una diezmilmillonésima de metro. En notación decimal,

Tamaño de un átomo = 0,0000000001 metros.

Note que el 1 aparece en el décimo lugar decimal. La notación científica para una diezmilmillonésima implica un exponente negativo:

$$0,0000000001 = 10^{-10}.$$

Los números con exponentes negativos son pequeños, y los números con exponentes positivos son grandes.

Hagamos un número más pequeño. Las partículas elementales, tales como el electrón, son muy ligeras comparadas con los objetos ordinarios. Un kilogramo es la masa de un litro de agua. La masa de un electrón es inmensamente más pequeña. De hecho, la masa de un único electrón es aproximadamente 9×10^{-31} kilogramos.

Multiplicar y dividir es muy fácil en notación científica. Lo que hay que hacer es sumar o restar los exponentes. He aquí algunos ejemplos:

$$10^{51} = 10^{42} \times 10^9.$$

$$10^{81} / 10^{80} = 10.$$

$$10^{-31} \times 10^9 = 10^{-22}.$$

Los exponentes no son la única abreviatura que se utiliza para describir números inmensamente grandes. Algunos de estos números tienen sus propios nombres. Por ejemplo, un *gugol* es 10^{100} (1 seguido de cien ceros), y 1 *gugolplex* es 10^{gugol} (1 seguido por un gugol de ceros), un número tremendamente mayor.

Equipados con estas ideas básicas, volvamos a un mundo algo menos abstracto —en este caso, a San Francisco, a los tres años del primer cuatrienio del Presidente Ronald Reagan, con la guerra fría y una nueva guerra a punto de empezar—.

Primera parte

Se forma la tormenta

*La historia será amable conmigo,
pues pretendo escribirla.*

WINSTON CHURCHILL¹⁰

Capítulo 1

El primer disparo

San Francisco, 1983

Los nubarrones de guerra se habían estado acumulando durante más de ochenta años cuando tuvo lugar la primera escaramuza en el ático de la mansión de Jack Rosenberg, en San Francisco. Jack, también conocido como Werner Erhard, era un gurú, un supervendedor con mucha labia y un poco tramposo. Antes de la década de los años setenta del siglo pasado había sido sólo Jack Rosenberg, un vendedor de enciclopedias. Luego, un día, mientras cruzaba el Golden Gate, tuvo una revelación. Salvaría al mundo y, mientras estuviera en él, haría una gran fortuna. Todo lo que necesitaba era un nombre más sofisticado y una nueva cancha. Su nuevo nombre sería Werner (por Werner Heisenberg) Erhard (por el estadista alemán Ludwig Erhard); la nueva cancha sería los Erhard Seminars Training, alias EST. Y tuvo éxito, si no en salvar el mundo, al menos en hacer una fortuna. Miles de personas tímidas e

¹⁰ Los títulos de las partes primera y cuarta de este libro están tomados de los volúmenes primero y quinto de la historia de la segunda guerra mundial de Churchill.

inseguras pagaron varios cientos de dólares para que les arengara, intimidara y (según la leyenda) les dijera que no podían ir al servicio durante los seminarios motivacionales de dieciséis horas dirigidos por Werner o uno de sus muchos discípulos. Era mucho más barato y más rápido que la psicoterapia, y a su manera era efectivo. Tímidos e inseguros al entrar, los asistentes parecían confiados, fuertes y cordiales —como lo era Werner— al salir. No importa que a veces parecieran robots maniacos de manos temblorosas. Ellos se sentían mejor. «El entrenamiento» fue incluso tema de una película muy divertida llamada *Dos más uno igual a dos* con Burt Reynolds.

Werner se rodeaba de fans de los EST. *Esclavos* sería un término demasiado fuerte; llamémosles *voluntarios*. Había cocineros EST entrenados para cocinar su comida, chóferes para llevarle a la ciudad, y toda clase de sirvientes domésticos para mantener su casa. Pero irónicamente, el propio Werner era un fan: un fan de la física.

A mí me gustaba Werner. Era inteligente, interesante y divertido. Y estaba fascinado por la física. Quería ser parte de ella, y por ello gastó mucho dinero en llevar grupos de físicos teóricos de élite a su mansión. A veces sólo unos pocos de sus íntimos —Sidney Coleman, David Finkelstein, Dick Feynman y yo— nos reuníamos en su casa para disfrutar de cenas espectaculares servidas por célebres chefs. Pero lo más importante es que a Werner le gustaba albergar conferencias pequeñas y elitistas. Con una sala de seminarios bien equipada en el ático, un equipo de voluntarios listos para satisfacer cualquiera de nuestros caprichos y San

Francisco como escenario, las miniconferencias eran muy divertidas. Algunos físicos recelaban de Werner. Pensaban que él iba a utilizar torticeramente la relación con la física para promocionarse, pero nunca lo hizo. Por lo que puedo decir, a él sólo le gustaba oír las últimas ideas de boca de los personajes que las estaban generando.

Creo que hubo tres o cuatro conferencias EST, pero sólo una de ellas dejó una huella indeleble en mí y en mi investigación en física. Fue en 1981. Entre los huéspedes estaban Murray Gell-Mann, Sheldon Glasgow, Frank Wilczek, Savas Dimopoulos y Dave Finkelstein. Pero para nuestra historia, los participantes más importantes eran los tres combatientes principales en la guerra de los agujeros negros: Gerard 't Hooft, Stephen Hawking y yo mismo.

Yo sólo me había encontrado con Gerard unas pocas veces antes de 1983, pero él me había causado una gran impresión. Todos sabían que era brillante, pero para mí era mucho más. Parecía tener un núcleo de acero, una firmeza intelectual que superaba a la de cualquier otro que yo conociera, con la posible excepción de Dick Feynman. Ambos eran un poco showmans. Dick era un showman americano: arrogante, irreverente y lleno de prejuicios machistas. En cierta ocasión, rodeado de un grupo de jóvenes físicos en CalTech, contaba una broma que le habían gastado los estudiantes de posgrado. Había una tienda de sándwiches en Pasadena donde servían sándwiches de «celebridades». Uno podía pedir un Humphrey Bogart, un Marilyn Monroe, y similares. Los estudiantes le habían llevado allí a almorzar —creo que era para su

cumpleaños— y uno tras otro pidieron el sándwich Feynman. Se habían puesto de acuerdo con el gerente por adelantado, y el dependiente que había tras el mostrador no pestañeó.

Cuando acabó de contar la historia le dije, «Oye, Dick, me pregunto qué diferencia habría entre un sándwich Feynman y un sándwich Susskind».

—«Oh, serían parecidos», respondió, «salvo que el sándwich Susskind tendría más jamón».

«Sí», respondí, «pero mucha menos salsa boloñesa». Esa fue probablemente la única vez que le gané en ese juegoⁱ.

Gerard es holandés. Los holandeses son las personas más altas de Europa, pero Gerard es pequeño y de constitución sólida, con bigote y aspecto de burgués. Como Feynman, 't Hooft tiene una fuerte vena competitiva, aunque estoy seguro de que nunca le he visto en sus mejores momentos. A diferencia de Feynman, él es un producto de la vieja Europa, el último gran físico europeo heredero del manto de Einstein y Bohr. Aunque es seis años menor que yo, ya sentía respeto por él en 1981, y con toda razón. En 1999 se le concedió el premio Nobel por su trabajo que llevó al modelo estándar para las partículas elementales.

Pero no es a Gerard a quien más recuerdo del ático de Werner. Es a Stephen Hawking, a quién conocí allí. Allí es donde Stephen dejó caer la bomba que desencadenó la guerra de los agujeros negros.

También Stephen es un showman. Físicamente es un hombre menudo —dudo que pese más cincuenta kilos— pero su cuerpo menudo contiene un intelecto prodigioso y un ego igualmente

excepcional. En aquella época, Stephen iba en una silla de ruedas más o menos normal, y todavía podía hablar con su propia voz, aunque era muy difícil entenderle a menos que uno estuviera mucho tiempo con él. Viajaba con un séquito que incluía a una enfermera y un joven colega que le escuchaba atentamente y luego repetía lo que Stephen había dicho.

En 1981 su traductor era Martin Rocek, ahora un físico bien conocido y uno de los pioneros de un tema importante llamado *supergravedad*. En el momento de la conferencia EST, sin embargo, Martin era bastante joven y no tan conocido. De todas formas, por encuentros previos, yo sabía que era un físico teórico muy capaz. En algún momento de nuestra conversación, Stephen, a través de Martin, dijo algo que yo pensaba que era erróneo. Yo me dirigí a Martin y le pedí que aclarase un poco lo dicho. Él me miró como una oveja deslumbrada por unos faros. Más tarde me dijo lo que había sucedido. Al parecer, traducir el habla de Stephen requería una concentración tan intensa que normalmente era incapaz de seguir la conversación. Apenas sabía de lo que estábamos hablando. Stephen da una imagen inusual. No me refiero a su silla de ruedas o a sus obvias limitaciones físicas. Pese a la inmovilidad de sus músculos faciales, su leve sonrisa es única, angelical y diabólica al mismo tiempo, y proyecta una sensación de diversión secreta. Durante la conferencia EST me resultó muy difícil hablar con Stephen. Necesitaba mucho tiempo para responder, y sus respuestas eran normalmente muy breves. Estas respuestas cortas, a veces de una sola palabra, su sonrisa, y su intelecto casi

incorpóreo eran desconcertantes. Era como hablar con el Oráculo de Delfos. Cuando alguien preguntaba algo a Stephen, la respuesta inicial era un silencio absoluto, y el resultado final solía ser incompresible. Pero la sonrisa sapiente decía, «Quizá *tú* no entiendas lo que digo, pero *yo* sí lo entiendo, y tengo razón».

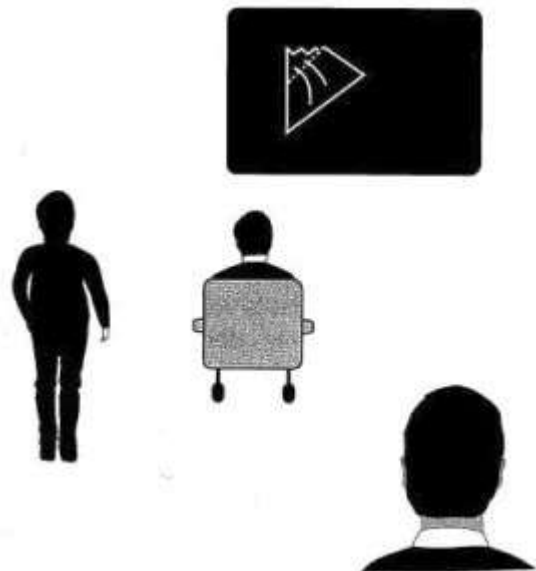
El mundo ve al diminuto Stephen como un hombre poderoso, un héroe de valor y fortaleza extraordinarios. Quienes le conocen ven otros aspectos: Stephen el Travieso y Stephen el Temerario. Una tarde, durante la conferencia EST, algunos de nosotros dábamos un paseo por una de las famosas colinas rompefrenos de San Francisco. Stephen venía con nosotros, conduciendo su silla motorizada. Cuando llegamos a la parte más pendiente, él mostró su sonrisa diabólica. Sin dudarlo, se lanzó cuesta abajo a la máxima velocidad, mientras los demás quedábamos estupefactos. Corrimos tras él, temiendo lo peor. Cuando llegamos abajo, le encontramos sentado y sonriente. Quería saber si había una cuesta todavía más pendiente donde intentarlo. Stephen Hawking el Evel Knievel de la físicaⁱⁱ.

De hecho, Stephen es también un físico temerario. Pero posiblemente su jugada más atrevida fue la bomba que dejó caer en el ático de Werner.

No puedo recordar cómo se desarrolló su charla en EST. Hoy día, cuando Stephen imparte un seminario sobre física, él permanece sentado en silencio en su silla mientras la voz incorpórea de un ordenador recita una grabación previa. Esa voz informatizada se ha convertido en el sello de Stephen; pese a su monotonía, está llena de

personalidad y humor. Pero volviendo a aquello, quizá él hablaba y Martin traducía. Como quiera que fuera, la bomba cayó a plomo sobre Gerard y yo Stephen afirmó que «la información se pierde cuando se evapora un agujero negro», y, lo que es peor, parecía demostrarlo. Si eso era cierto, advertimos Gerard y yo, los fundamentos de nuestra disciplina quedaban destruidos. ¿Cómo recibió la noticia el resto de los que estaban en el ático de Werner? Como el coyote que persigue al correcaminos y se pasa del borde del precipicio: ya no hay suelo bajo sus pies, pero él todavía no lo sabe. Se dice de los cosmólogos que suelen estar equivocados pero nunca dudosos. Si es así, Stephen sólo es cosmólogo a medias: nunca duda, pero apenas se equivoca. En este caso sí lo hacía. Pero el error de Stephen era uno de los más seminales en la historia de la física, y en última instancia pudo llevar a un profundo cambio de paradigma sobre la naturaleza del espacio, el tiempo y la materia.

La charla de Stephen fue la última del día. Cuando concluyó, Gerard permaneció durante casi una hora mirando fijamente el diagrama que había en la pizarra de Werner. Todos los demás se habían ido. Todavía puedo ver el ceño en la cara de Gerard y la sonrisa divertida en la de Stephen. Nadie decía nada. Era un momento electrificante.



En la pizarra había un *diagrama de Penrose*, un tipo de diagrama que representa un agujero negro. El horizonte (el límite del agujero negro) estaba dibujado como una línea de trazos, y la singularidad en el centro del agujero negro era una línea quebrada de aspecto ominoso. Las líneas que apuntaban hacia dentro cruzando el horizonte representaban bits de información que atravesaban el horizonte y caían en la singularidad. No había líneas que salieran. Según Stephen, dichos bits se perdían irremediablemente. Para empeorar las cosas, Stephen había demostrado que los agujeros negros acababan por evaporarse y desaparecer, sin dejar ninguna huella de lo que había caído dentro.

La teoría de Stephen iba aún más lejos. Él postulaba que el vacío — el espacio vacío— estaba lleno de agujeros negros «virtuales» que nacían y morían tan rápidamente que no los advertíamos. El efecto de estos agujeros negros virtuales, afirmaba, era borrar información, incluso si no había ningún agujero negro «real» en la vecindad.

En el capítulo 7 aprenderá usted lo que significa *información* exactamente, y también lo que significa perderla. Por ahora, simplemente fíese de mí: esto era un desastre sin paliativos. 'T Hooft y yo lo sabíamos, pero la respuesta de todos los demás que lo oyeron ese día fue «¡Vaya!, la información se pierde en los agujeros negros». El propio Stephen se mostraba confiado. Para mí, la parte más dura de tratar con Stephen ha sido siempre la irritación que siento ante su complacencia. La pérdida de información era algo que no podía ser correcto, pero Stephen no podía verlo.

La conferencia terminó, y todos nos volvimos a casa. Para Stephen y Gerard eso significaba volver a la Universidad de Cambridge y a la Universidad de Utrecht, respectivamente; para mí era un viaje de unos cuarenta minutos hacia el sur por la Carretera 201 hasta Palo Alto y la Universidad de Stanford. Resultaba difícil concentrarse con el tráfico. Era un frío día de enero, y cada vez que me paraba o frenaba, yo dibujaba la figura de la pizarra de Werner en mi parabrisas escarchado.

De vuelta en Stanford, le conté a mi amigo Tom Barks lo que afirmaba Stephen. Tom y yo reflexionamos intensamente sobre ello. Para intentar saber algo más, invité incluso a uno de los antiguos estudiantes de Stephen para que viniera desde California del Sur. Todos recelábamos de la afirmación de Stephen, pero durante algún tiempo no estábamos seguros de por qué. ¿Qué había de malo en perder un bit de información dentro de un agujero negro? Entonces se hizo la luz sobre nosotros. Perder información es lo mismo que generar entropía. Y generar entropía significa generar calor. Los agujeros negros virtuales que Stephen había postulado tan alegremente crearían calor en el espacio vacío. Junto con otro colega, Michael Peskin, hicimos una estimación basada en la teoría de Stephen. Encontramos que si Stephen tenía razón, el espacio vacío se calentaría hasta un quintillón de grados en una minúscula fracción de segundo. Aunque yo sabía que Stephen estaba equivocado, no podía encontrar la laguna en su razonamiento. Quizá eso era lo que más me irritaba.

La consiguiente guerra de los agujeros negros fue más que una discusión entre físicos. Fue también una guerra de ideas, o quizá una guerra entre principios fundamentales. Los principios de la mecánica cuántica y los de la relatividad general siempre parecían estar en lucha, y no estaba claro que pudieran coexistir. Hawking es un relativista general que ha puesto su confianza en el principio de equivalencia de Einstein.

'T Hooft y yo somos físicos cuánticos que teníamos por cierto que las leyes de la mecánica cuántica no podían ser violadas sin destruir los fundamentos de la física. En los próximos tres capítulos fijaré el escenario para la guerra de los agujeros negros explicando las ideas básicas de los agujeros negros, la relatividad general y la mecánica cuántica.

Capítulo 2

La estrella oscura

Hay más cosas en el cielo y la tierra, Horacio, de las que puedes soñar en tu filosofía.

WILLIAM SHAKESPEARE

Hamlet

El más temprano atisbo de algo parecido a un agujero negro llegó a finales del siglo XVIII, cuando el gran físico francés Pierre-Simon de Laplace y el clérigo inglés John Michell tuvieron la misma idea extraordinaria. En aquella época todos los físicos estaban muy interesados en la astronomía. Todo lo que se sabía de los cuerpos astronómicos se sabía gracias a la luz que estos emitían o, en el caso de la Luna y los planetas, a la luz que reflejaban. En la época de Michell y Laplace, Isaac Newton, aunque muerto hacía ya medio siglo, era la influencia más poderosa en física. Newton creía que la luz estaba compuesta de partículas minúsculas —él las llamaba corpúsculos— y si era así, ¿por qué la luz no iba a ser afectada por la gravedad? Laplace y Michell se preguntaron si podría haber estrellas tan masivas y densas que la luz no pudiera escapar de su atracción gravitatoria. ¿No serían estas estrellas, si existieran, completamente oscuras y, por lo tanto, invisibles?

¿Puede un proyectil¹¹ —una piedra, una bala, o incluso una partícula elemental— llegar a escapar de la atracción gravitatoria de una masa tal como la Tierra? En cierto sentido, sí, y en cierto sentido, no. El campo gravitatorio de una masa no tiene fin; se extiende hasta el infinito y se hace cada vez más débil a medida que aumenta la distancia. Por lo tanto, un proyectil nunca puede escapar por completo de la gravedad de la Tierra. Pero si un proyectil se lanza hacia arriba con una velocidad suficientemente grande, continuará su movimiento ascendente indefinidamente, pues la gravedad decreciente es demasiado débil para frenarlo y devolverlo a la superficie. Es en este sentido en el que un proyectil puede escapar de la gravedad de la Tierra.

Ni el más fuerte de los seres humanos tiene posibilidad alguna de lanzar una piedra al espacio exterior. Un lanzador de béisbol profesional podría lanzar hasta una altura de setenta metros, aproximadamente una cuarta parte de la altura del Empire State. Si ignoramos la resistencia del aire, una pistola puede disparar una bala hasta una altura de unos cinco kilómetros. Pero hay una cierta velocidad —llamada de forma bastante natural *velocidad de escape*— que es la justa para lanzar un objeto a una trayectoria ilimitada y eterna. Si parte con una velocidad algo menor que la velocidad de escape, un proyectil caerá de nuevo a la Tierra. Si parte con una velocidad mayor, el proyectil escapará al infinito. La

¹¹ El *American Heritage Dictionary of the English Language* (4.^a ed.) define un proyectil como «un objeto disparado, lanzado o propulsado de otra manera, tal como una bala, que no tiene capacidad de autopropulsión». ¿Podría una simple partícula de luz ser un proyectil? Según Michell y Laplace la respuesta era sí.

velocidad de escape desde la superficie de la Tierra es de unos 40 000 kilómetros por hora¹².

Por el momento, llamaremos *estrella* a cualquier objeto astronómico masivo, ya sea un planeta, un asteroide o una verdadera estrella. La Tierra es simplemente una estrella pequeña, la Luna una estrella aún más pequeña, y así sucesivamente. Según la ley de Newton, la influencia gravitatoria de una estrella es proporcional a su masa, de modo que es completamente natural que la velocidad de escape dependa también de la masa de la estrella. Pero la masa es sólo la mitad de la historia. La otra mitad tiene que ver con el radio de la estrella. Imagine que cuando usted está de pie en la superficie de la Tierra, alguna fuerza empieza a comprimir la Tierra a un tamaño menor, pero sin perder nada de su masa. Si usted estuviera en la superficie de la Tierra, la compresión le acercaría más a todos y cada uno de los átomos de la Tierra. Conforme usted se acercara más a la masa, el efecto de la gravedad se haría más poderoso. Su propio peso —una función de la gravedad— aumentaría, y, como cabría esperar, se haría más difícil escapar de la atracción de la Tierra. Esto ilustra una regla fundamental de la física: si se comprime una estrella (sin pérdida de masa), la velocidad de escape aumenta.

Imagine ahora la situación contraria. Por alguna razón, la Tierra se expande, de modo que usted se aleja de la masa. La gravedad en la superficie se haría más débil y por lo tanto sería más fácil escapar.

¹² La velocidad de escape es una idealización que ignora efectos tales como la resistencia del aire, que haría necesario que el objeto tenga una velocidad mucho mayor.

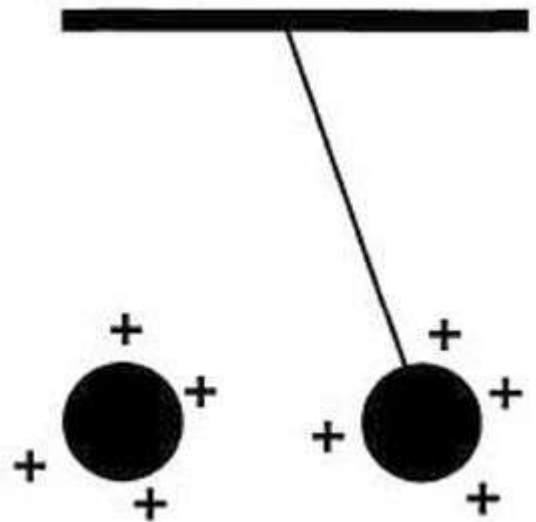
La pregunta que se hacían Michell y Laplace era si una estrella podía tener una masa tan grande y un tamaño tan pequeño que la velocidad de escape superara a la velocidad de la luz.

Cuando Michell y Laplace tuvieron su idea profética, hacía más de cien años que se conocía cuál era la velocidad de la luz (denotada por la letra c). El astrónomo danés Ole Rømer había determinado c en 1676 y había encontrado que la luz viaja a la extraordinaria velocidad de 300.000 kilómetros (unas siete veces la vuelta al mundo) por segundo.

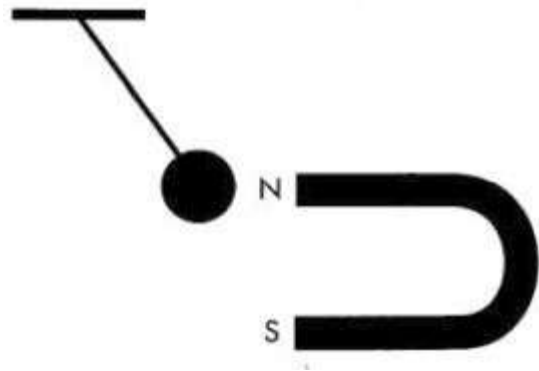
$$c = 300.000 \text{ kilómetros por segundo.}$$

Con esta enorme velocidad, sería necesaria una masa extraordinariamente grande o extraordinariamente concentrada para atrapar la luz, pero no había ninguna razón obvia para que no pudiera suceder. El artículo que envió Michell a la Royal Society fue la primera referencia a los objetos que John Wheeler llamaría más tarde *agujeros negros*.

Quizá le sorprenda saber que, por lo que se refiere a las fuerzas, la gravedad es extraordinariamente débil. Quizá un levantador de pesas y un saltador de altura no piensan así, pero un sencillo experimento muestra lo débil que es la



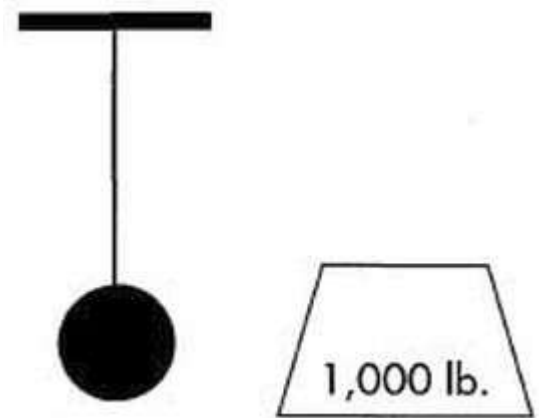
gravedad. Empecemos con un objeto liviano: una pequeña bola de espuma de poliestireno servirá. A continuación, y por el medio que sea, cargue la bola con alguna electricidad estática. (Frotarla contra su jersey debería ser suficiente). Cuélguela ahora del techo con un hilo. Cuando deja de oscilar, el hilo colgará en vertical. A continuación, ponga un segundo objeto cargado de la misma forma cerca del peso colgante. La fuerza electrostática empujará al peso suspendido y hará que el hilo cuelgue a un cierto ángulo respecto a la vertical.



Lo mismo puede hacerse con un imán si el peso que cuelga está hecho de hierro.

Prescinda ahora de la carga eléctrica y del imán, e intente desviar el peso pequeño acercando una masa muy pesada. La atracción gravitatoria de dicha masa pesada tirará del peso colgante, pero el efecto será demasiado débil para ser detectado. La gravedad es extraordinariamente débil comparada con las fuerzas eléctrica y magnética.

Pero si la gravedad es tan débil, ¿por qué no podemos saltar hasta la Luna? La respuesta es que la enorme masa de la Tierra, 6×10^{24} kilogramos, compensa



fácilmente la debilidad de la gravedad. Pero incluso con esa masa, la velocidad de escape desde la superficie de la Tierra es menor que una diezmilésima de la velocidad de la luz. La estrella oscura de las imaginaciones de Michell y de Laplace tendría que ser tremendamente masiva y estar tremendamente comprimida para que la velocidad de escape pudiera que ser mayor que c .

Sólo para darle una idea de las magnitudes implicadas, veamos las velocidades de escape de algunos objetos astronómicos. Escapar de la superficie de la Tierra requiere una velocidad inicial de unos 11 kilómetros por segundo, que, como he dicho, es unos 40 000 kilómetros por hora. Para los patrones terrestres, eso es muy rápido, pero comparada con la velocidad de la luz, es ir a paso de tortuga.

Usted tendría muchas más posibilidades de escapar de un asteroide que de la Tierra. Un asteroide con un radio de dos kilómetros tiene una velocidad de escape de unos 2 metros por segundo: un salto fácil. Por el contrario, el Sol es mucho mayor que la Tierra, tanto en radio como en masa¹³. Estas dos cosas se contraponen. La mayor masa hace más difícil escapar de la superficie del Sol, mientras que el mayor radio lo hace más fácil. No obstante, la masa se impone y la velocidad de escape del Sol es unas cincuenta veces mayor que desde la superficie de la Tierra. Eso es aún una velocidad mucho más lenta que la velocidad de la luz.

¹³ La masa del Sol es de unos 2×10^{30} kilogramos. Eso es medio millón de veces la masa de la Tierra. El radio del Sol es de unos 700 000 kilómetros, o unas cien mil veces el radio de la Tierra.

El Sol no va a tener siempre el mismo tamaño, sin embargo. Con el tiempo, cuando una estrella agota su combustible, la presión hacia fuera que genera su calor interno decrece. Como una prensa gigante, la gravedad empieza a comprimir la estrella hasta reducirla a una pequeña fracción de su tamaño original. Dentro de unos cinco mil millones de años, el Sol estará consumido y colapsará hasta lo que se conoce como una *enana blanca*, con un radio aproximadamente igual al de la Tierra. Escapar de su superficie requerirá una velocidad de 7000 kilómetros por segundo —rápida, pero sólo un 2 por 100 de la velocidad de la luz.

Si el Sol fuera un poco más pesado —aproximadamente vez y media su valor real— la masa adicional lo comprimiría más allá de la fase de enana blanca. Los electrones de la estrella serían aplastados contra los protones para formar una bola de neutrones increíblemente densa.

Una estrella de neutrones es tan densa que una sola taza de té de dicho material pesaría más de cinco billones de kilos. Pero una estrella de neutrones todavía no es una estrella oscura; la velocidad de escape desde su superficie estaría próxima a la velocidad de la luz (aproximadamente un 80 por 100 de c), pero sin llegar todavía a ella.

Si la estrella que colapsa fuera aún más pesada —digamos, unas cinco veces la masa del Sol— ni siquiera la densa bola de neutrones sería capaz de soportar el tirón hacia dentro de la gravedad. En una implosión final, sería comprimida hasta una *singularidad*: un punto de densidad y potencia destructiva casi infinitas. La velocidad de

escape desde ese núcleo minúsculo sería mucho mayor que la velocidad de la luz. Así, una estrella oscura —o como diríamos hoy, un agujero negro— habría nacido.

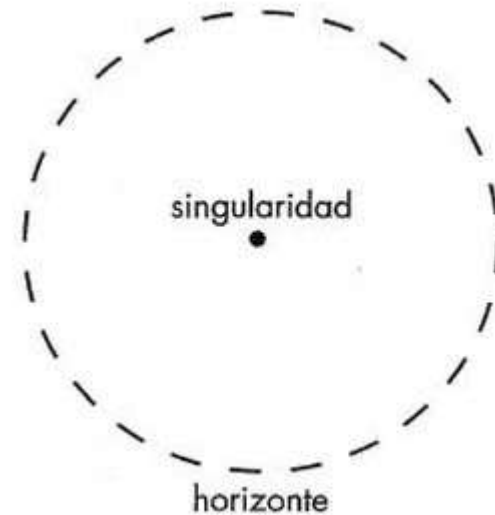
A Einstein le disgustaba tanto la idea de los agujeros negros que descartó su posibilidad, afirmando que nunca podrían formarse. Pero le gustaran a Einstein o no, los agujeros negros son reales. Los astrónomos los estudian hoy rutinariamente, no sólo en forma de simples estrellas colapsadas sino también en los centros de las galaxias, donde millones e incluso miles de millones de estrellas se han fusionado en gigantes negros.

El Sol no es suficientemente pesado para comprimirse en un agujero negro, pero si pudiéramos ayudarlo prensándolo en una prensa cósmica hasta un radio de sólo tres kilómetros, se convertiría en un agujero negro. Usted podría pensar que si se relajara la presión de la



prensa, se expandiría de nuevo hasta un radio de unos ocho kilómetros. Pero para entonces sería demasiado tarde; el material del Sol habría entrado en una especie de caída libre. La superficie habría pasado rápidamente el mojón de un kilómetro, el mojón de un metro y el mojón de un centímetro. No habría parada hasta que se formara una singularidad, y esa terrible implosión sería irreversible.

Imaginemos que nos encontráramos cerca de un agujero negro, pero en un punto muy alejado de la singularidad. ¿Escaparía del agujero negro la luz que partiera de dicho punto? La respuesta depende tanto de la masa del agujero negro como del punto exacto en donde la luz iniciara su viaje. Una esfera imaginaria llamada el *horizonte* divide el universo en dos. La luz que parte de dentro del horizonte será atraída de nuevo inevitablemente al agujero negro, pero la luz que parte desde el exterior del horizonte puede escapar de la gravedad del agujero negro. Si el Sol llegara a convertirse en un agujero negro, el radio del horizonte sería de unos tres kilómetros.



El radio del horizonte se denomina *radio de Schwarzschild*. Se llama así por el astrónomo Kart Schwarzschild, que fue el primero en estudiar las matemáticas de los agujeros negros. El radio de Schwarzschild depende de la masa del agujero negro; de hecho, es directamente proporcional a la masa. Por ejemplo, si la masa del Sol se reemplazara por un millar de masas solares, un rayo de luz que partiera a cuatro o cinco kilómetros de distancia no tendría posibilidad de escapar, porque el radio del horizonte se multiplicaría por mil, hasta tres mil kilómetros.

La proporcionalidad entre la masa y el radio de Schwarzschild es lo primero que aprende un físico acerca de los agujeros negros. La

Tierra es aproximadamente un millón de veces menos masiva que el Sol, de modo que su radio de Schwarzschild es un millón de veces más pequeño que el del Sol. Tendría que comprimirse hasta el tamaño de una cereza para formar una estrella oscura. Por el contrario, agazapado en el centro de nuestra galaxia hay un agujero negro supergigante con un radio de Schwarzschild de casi doscientos millones de kilómetros —aproximadamente el tamaño de la órbita de la Tierra en torno al Sol. Y en otras regiones del universo, hay monstruos aún más grandes que eso.

No hay un lugar más desagradable que la singularidad de un agujero negro. Nada puede sobrevivir a sus fuerzas infinitamente poderosas. Einstein estaba tan aterrado por la idea de una singularidad que se rebeló contra ella. Pero no había escapatoria. Si se acumula masa suficiente, nada puede soportar el aplastante tirón hacia el centro.

Las mareas y el Hombre de 3000 kilómetros

¿Qué es lo que hace que el mar ascienda y descienda dos veces cada día como si estuviera respirando? Es la Luna, por supuesto, pero ¿cómo lo hace y por qué dos veces al día? Lo explicaré, pero primero déjeme decirle algo sobre la caída del Hombre de 3000 kilómetros.

Imagine al Hombre de 3000 kilómetros —un gigante que mide kilómetros desde la coronilla hasta la planta de los pies— mientras cae, con los pies por delante, desde el espacio exterior hacia la Tierra. En el espacio exterior la gravedad es débil; tan débil que él no siente nada. Pero a medida que se acerca a la Tierra, siente

extrañas sensaciones en su largo cuerpo: sensaciones no de estar cayendo, sino de ser estirado.

El problema no es la aceleración global del gigante hacia la Tierra. La causa de su malestar es que la gravedad no es uniforme a lo largo del espacio. Lejos de la Tierra está casi por completo ausente.

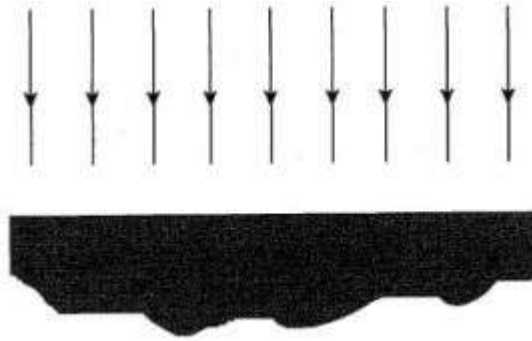
Pero cuando él se aproxima, la atracción de la gravedad aumenta. Para el Hombre de 3000 kilómetros esto presenta dificultades incluso mientras está en caída libre. El pobre es tan alto que la atracción que tira de sus pies es mucho más fuerte que la que tira de su cabeza. El efecto neto es una desagradable sensación de que se está tirando de su cabeza y de sus pies en direcciones opuestas.

Quizá pueda evitar el ser estirado si cae en una posición horizontal con piernas y cabeza a la misma altura. Pero cuando el gigante lo intenta, encuentra una nueva incomodidad; la sensación de estiramiento queda reemplazada por una sensación de compresión. Él se siente como si su cabeza fuera presionada hacia sus pies.

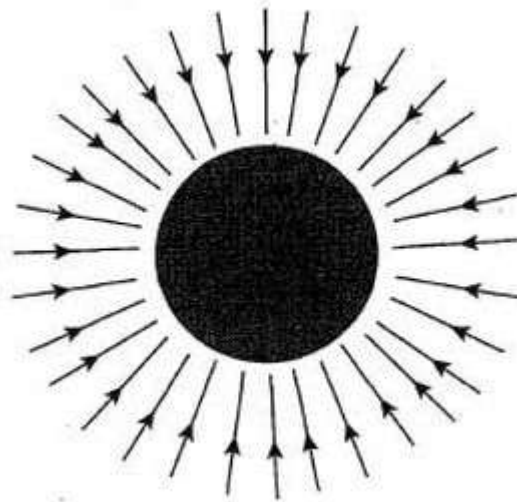
Para entender por qué es así, imaginemos momentáneamente que la Tierra es plana. Éste es el aspecto que tendría: las líneas verticales, con las flechas, indican la dirección de la fuerza gravitatoria — directa hacia abajo, lo que no es sorprendente. Pero además de eso, la intensidad de la atracción gravitatoria es totalmente uniforme. El



Hombre de kilómetros no tendría problemas en este entorno, ya cayera vertical u horizontalmente. (No los tendría al menos hasta que chocara con el suelo).

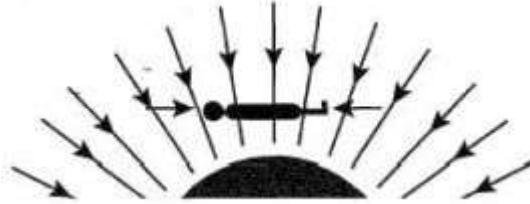


Pero la Tierra no es plana. Tanto la intensidad como la dirección de la gravedad varían. En lugar de tirar en una sola dirección, la gravedad tira directamente hacia el centro del planeta, como esto:



Esto crea un nuevo problema para el gigante si cae horizontal. La fuerza sobre su cabeza y sobre sus pies no será la misma porque la gravedad, cuando tira hacia el centro de la Tierra, empujará su

cabeza hacia sus pies, dejándole la extraña sensación de que está siendo comprimido.



Volvamos a la cuestión de las mareas oceánicas. La causa del ascenso y descenso de los mares dos veces al día es exactamente la misma que la causa de la incomodidad del Hombre de 3000 kilómetros: la no uniformidad de la gravedad. Pero en este caso, es la gravedad de la Luna, no la de la Tierra. La atracción de la Luna sobre los océanos es más intensa en la cara de la Tierra que se presenta a la Luna y más débil en la cara contraria. Usted esperaría que la Luna cree un único abultamiento oceánico en la cara más próxima, pero eso es erróneo. Por la misma razón que la cabeza del hombre alto es separada de sus pies, el agua en ambas caras de la Tierra —la próxima y la lejana— se abomba. Una manera de verlo es que en la cara próxima la Luna tira del agua y la separa de la Tierra, pero en la cara lejana, tira de la Tierra y la separa del agua. El resultado es dos abombamientos en las caras opuestas de la Tierra,



uno hacia la Luna y el otro en la dirección contraria. Mientras la Tierra da una vuelta completa bajo los abombamientos, cada punto de la superficie experimenta dos mareas altas.

Las fuerzas distorsionantes causadas por las variaciones en la intensidad y la dirección de la gravedad se llaman *fuerzas de marea*, ya sean debidas a la Luna, la Tierra, el Sol o cualquier otra masa astronómica. ¿Podemos los seres humanos de tamaño normal sentir fuerzas de marea —por ejemplo, cuando saltamos desde un trampolín? No, no podemos, pero sólo porque somos tan pequeños que el campo gravitatorio de la Tierra apenas varía a lo largo de la longitud de nuestro cuerpo.

Descenso a los infiernos

Entré en el camino profundo y salvaje.

DANTE, La divina comedia

Las fuerzas de marea no serían tan benévolas si usted cayera hacia un agujero negro de una masa solar. Toda esa masa compactada en el minúsculo volumen del agujero negro no sólo hace la gravedad muy fuerte cerca del horizonte sino que también la hace muy poco uniforme. Mucho antes de que usted llegara al radio de Schwarzschild, cuando estuviera a más de 150 000 kilómetros del agujero negro, las fuerzas de marea se harían bastante desagradables. Como el Hombre de kilómetros, usted sería demasiado grande para las grandes variaciones del campo

gravitatorio del agujero negro con la distancia. Para cuando llegará cerca del horizonte, usted estaría deformado, casi como la pasta de dientes que sale estrujada del tubo.

Hay dos remedios para las fuerzas de marea en el horizonte de un agujero negro: que usted se haga más pequeño o que el agujero negro se haga más grande. Una bacteria no notaría las fuerzas de marea en el horizonte de un agujero negro de masa solar, pero tampoco usted notaría las fuerzas de marea en el horizonte de un agujero negro de un millón de masas solares. Esto puede parecer contraintuitivo, puesto que la influencia gravitatoria del agujero negro más masivo sería más intensa. Pero ese pensamiento olvida un hecho importante: el horizonte del agujero negro más grande sería tan grande que parecería casi plano. Cerca del horizonte, el campo gravitatorio sería muy intenso, pero prácticamente uniforme. Si usted sabe algo de gravedad newtoniana, puede calcular las fuerzas de marea en el horizonte de una estrella oscura. Lo que encontrará es que cuanto más grande y masiva sea la estrella oscura, más débiles son las fuerzas de marea en el horizonte. Por esa razón, cruzar el horizonte de un agujero negro muy masivo pasaría desapercibido. Pero en definitiva, no hay escapatoria de las fuerzas de marea, ni siquiera en el agujero negro más grande. El tamaño mayor sólo retrasaría lo inevitable. Con el tiempo, el inevitable descenso hacia la singularidad sería tan terrible como cualquier tortura que imaginara Dante o que infligiera Torquemada durante la Inquisición Española. (El potro viene a la mente). Incluso la más pequeña bacteria sería estirada a lo largo del eje vertical y, al

mismo tiempo, comprimida horizontalmente. Las moléculas pequeñas sobrevivirán más tiempo que las bacterias, y los átomos un tiempo aún mayor. Pero más pronto o más tarde, la singularidad vencería, incluso sobre un único protón. Yo no sé si Dante tenía razón al afirmar que ningún pecador puede escapar de los tormentos del infierno, pero estoy completamente seguro de que nada puede escapar de las terribles fuerzas de marea en la singularidad de un agujero negro.

Pese a las extrañas y brutales propiedades de la singularidad, no es allí donde yacen los misterios más profundos de los agujeros negros. Sabemos lo que le sucede a un objeto suficientemente desafortunado para ser atraído a la singularidad, y no es agradable. Pero agradable o no, la singularidad no es tan paradójica como el horizonte. Casi nada en la física moderna ha creado mayor confusión que la pregunta. ¿Qué sucede con la materia cuando atraviesa el horizonte? Cualquiera que sea la respuesta que usted le dé, probablemente es errónea.

Michell y Laplace vivieron mucho antes de que naciera Einstein y no podían haber sospechado los dos descubrimientos que éste haría en 1905. El primero era la teoría de la relatividad especial, que descansa en el principio de que nada —ni la luz ni ninguna otra cosa— puede superar la velocidad de la luz. Michell y Laplace entendían que la luz no podía escapar de una estrella oscura, pero no se dieron cuenta de que ninguna otra cosa podía hacerlo.

El segundo descubrimiento de Einstein en 1905 era que la luz estaba formada realmente de partículas. Poco después de que

Michell y Laplace especularan sobre las estrellas oscuras, la teoría corpuscular de Newton para la luz cayó en desgracia. Se acumulaban las pruebas de que la luz consistía en ondas, similares a las ondas sonoras o a las olas en la superficie del mar. Hacia 1865, James Clerk Maxwell había imaginado que la luz consiste en campos eléctrico y magnético ondulantes, que se propagan a través del espacio a la velocidad de la luz, y la teoría corpuscular de la luz estaba tan muerta como el miriñaque. Parece que nadie había pensado todavía que las ondas electromagnéticas pudieran ser también atraídas por la gravedad, y con ello las estrellas oscuras fueron olvidadas.

Olvidadas hasta 1917, cuando el astrónomo Kart Schwarzschild resolvió las ecuaciones de la recién nacida teoría de la relatividad general de Einstein y redescubrió la estrella oscura¹⁴.

El principio de equivalencia

Como la mayor parte del trabajo de Einstein, la teoría de la relatividad general era difícil y sutil, pero surgía de observaciones muy simples. De hecho, eran tan elementales que cualquiera podría haberlas hecho, pero nadie lo hizo.

Era propio del estilo de Einstein extraer conclusiones de muy gran alcance de los más simples experimentos mentales. (Personalmente, siempre he admirado esta forma de pensar sobre todas las demás).

¹⁴ Hay varios tipos de agujeros negros. En particular, algunos pueden rotar alrededor de un eje si la estrella original estaba rotando (todas las estrellas lo hacen en alguna medida), y pueden estar eléctricamente cargados. Los electrones que cayeran en un agujero negro lo cargarían. Sólo el tipo de agujeros negros que no rota ni tiene carga se llaman agujeros negros de Schwarzschild.

En el caso de la relatividad general, el experimento mental implicaba a un observador en un ascensor. Los libros de texto suelen ponerlo al día y reemplazan el ascensor por una nave espacial, pero en la época de Einstein los ascensores eran la nueva y excitante tecnología. Él imaginó en primer lugar que el ascensor flotaba libremente en el espacio exterior, lejos de cualquier objeto gravitante. Cualquiera que estuviera en el ascensor experimentaría una completa ingravidez, y los proyectiles se moverían en trayectorias perfectamente rectas con velocidad uniforme. Los rayos de luz harían exactamente lo mismo, pero por supuesto a la velocidad de la luz.

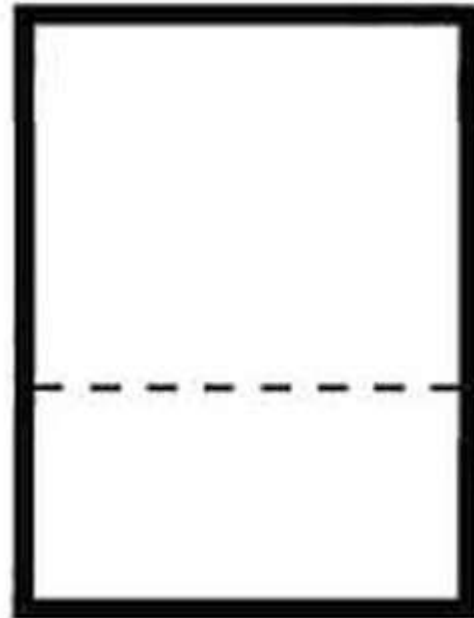
A continuación Einstein imaginó lo que sucedería si el ascensor se acelerara hacia arriba, quizá por medio de un cable atado a un ancla lejana o por medio de cohetes colocados en la parte inferior. Los pasajeros serían empujados hacia el suelo, y las trayectorias de los proyectiles se curvarían hacia abajo, en órbitas parabólicas. Todo sería exactamente igual que si estuviera bajo la influencia de la gravedad. Todo el mundo desde Galileo lo sabía, pero le correspondía a Einstein hacer de este simple hecho un nuevo y potente principio físico. El principio de equivalencia afirma que no hay absolutamente ninguna diferencia entre los efectos de la



gravedad y los efectos de la aceleración. Ningún experimento realizado dentro del ascensor podría revelar si el ascensor estaba parado en un campo gravitatorio o si estaba acelerado en el espacio exterior.

En sí mismo, esto no era sorprendente, pero las consecuencias eran trascendentales.

En la época en que Einstein formuló el principio de equivalencia se sabía muy poco de cómo la gravedad afectaba a otros fenómenos, tales como la corriente eléctrica, el comportamiento de los imanes o la propagación de la luz. El método de Einstein consistía en calcular



primero cómo influía la aceleración en estos fenómenos. Normalmente eso no implicaba ninguna física nueva o desconocida. Todo lo que tenía que hacer era imaginar cómo se verían los fenómenos conocidos desde un ascensor acelerado. El principio de equivalencia le diría entonces cuáles serían los efectos de la gravedad.

El primer ejemplo implicaba el comportamiento de la luz en un campo gravitatorio. Imaginemos un rayo luminoso que cruza el ascensor horizontalmente, de izquierda a derecha. Si el ascensor estuviera moviéndose libremente, lejos de cualquier masa

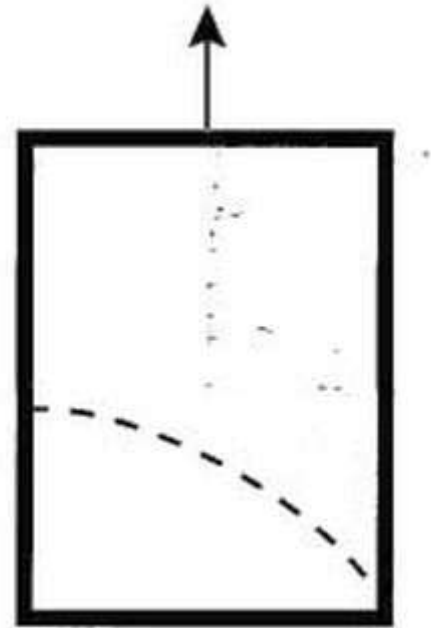
gravitante, la luz se movería siguiendo una línea perfectamente horizontal.

Pero hagamos ahora que el ascensor se acelere hacia arriba. La luz parte del lado izquierdo del ascensor moviéndose en horizontal pero, debido a la aceleración del ascensor, cuando llega a la otra pared parecerá tener una componente de movimiento hacia abajo. Desde un punto de vista, el ascensor se ha acelerado hacia arriba, pero para un pasajero, la luz parece acelerarse hacia abajo.

De hecho, la trayectoria de un rayo luminoso se curva de la misma forma que la trayectoria de una partícula muy rápida. Este efecto no tiene nada que ver con que la luz esté hecha de ondas o de partículas;

es simplemente el efecto de la aceleración hacia arriba. Pero, argumentaba Einstein, si la aceleración hace que se curve la trayectoria de un rayo de luz, también debe hacerlo la gravedad. En realidad, se podría decir que la gravedad tira de la luz y la hace caer. Esto es exactamente lo que Michell y Laplace habían conjeturado.

Hay otra cara de la moneda: si la aceleración puede simular los efectos de la gravedad, también puede cancelarlos. Imagine que el mismo ascensor ya no está infinitamente lejos en el espacio exterior sino que está en lo alto de un rascacielos. Si sigue estando en



reposito, los pasajeros experimentarían el efecto pleno de la gravedad, incluida la curvatura de los rayos luminosos cuando estos cruzan el ascensor. Pero luego el cable del ascensor se rompe, y el ascensor empieza a acelerarse hacia el suelo. Durante el breve intervalo de caída libre, la gravedad parece haber sido neutralizada dentro del ascensor¹⁵. Los pasajeros flotan en la cabina sin ningún sentido de arriba o abajo. Las partículas y los rayos luminosos viajan en perfectas líneas rectas. Esa es la otra cara del principio de equivalencia.

Agujeros de desagüe, agujeros mudos y agujeros negros

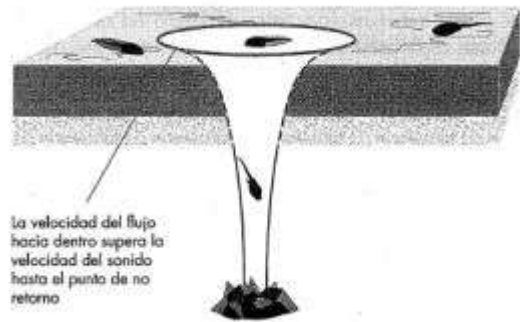
Cualquiera que trate de describir la física moderna sin utilizar fórmulas matemáticas sabe lo útiles que pueden ser las analogías. Por ejemplo, es muy útil pensar en un átomo como un Sistema Solar en miniatura, y la utilización de la mecánica ordinaria para describir una estrella oscura puede servir a quien no esté preparado para sumergirse en las matemáticas avanzadas de la relatividad general. Pero las analogías tienen sus limitaciones, y la analogía de una estrella oscura como un agujero negro falla cuando la llevamos demasiado lejos. Hay otra analogía mejor. Yo la aprendí de uno de los pioneros de la mecánica cuántica de los agujeros negros, Bill Unruh. Quizá me gusta especialmente debido a mi primer oficio, que fue el de fontanero.

¹⁵ Estoy suponiendo que el ascensor es lo suficientemente pequeño para que las fuerzas de marea sean despreciables.

Imagine un lago infinito y poco profundo. Sólo tiene unos metros de profundidad, pero se extiende indefinidamente en las direcciones horizontales. Una especie de renacuajos ciegos pasan toda su vida en el lago, sin conocer la luz, pero son muy buenos utilizando el sonido para localizar objetos y comunicarse. Hay una regla inquebrantable: nada puede moverse en el agua a más velocidad que el sonido. Para la mayoría de los fines, el límite de velocidad no es importante, puesto que los renacuajos se mueven mucho más lentos que el sonido.

Hay un peligro en este lago. Muchos renacuajos lo han descubierto demasiado tarde para salvarse, y nadie ha regresado nunca para contarlo. En el centro del lago hay un desagüe. El agua se vacía a través del desagüe en una cueva subterránea, donde cae en cascada sobre rocas con un filo mortal.

Si se mira el lago desde arriba, se puede ver que el agua se mueve hacia el desagüe. Lejos de éste, la velocidad es tan pequeña que resulta indetectable, pero más cerca, el agua empieza a tomar velocidad.



Supongamos que el desagüe evacúa el agua con tanta rapidez que a una cierta distancia su velocidad se hace igual a la del sonido. Más cerca aún del desagüe, el flujo se hace supersónico. Ahora tenemos un desagüe muy peligroso.

Los renacuajos que flotan en el agua, y sólo experimentan su ambiente líquido, nunca saben a qué velocidad se están moviendo;

todo lo que hay en su vecindad es arrastrado a la misma velocidad. El mayor peligro es que pueden ser succionados en el agujero y luego destruidos contra las rocas. De hecho, una vez que uno de ellos haya cruzado el radio donde la velocidad hacia dentro supera la velocidad del sonido, está condenado. Una vez pasado el punto de no retorno, no puede nadar contra la corriente, no puede avisar a nadie en la zona segura (ninguna señal audible se mueve a través del agua a más velocidad que el sonido). Unruh llama al desagüe y su punto de no retorno un *agujero mudo* —mudo en el sentido de silente— porque ningún sonido puede escapar del mismo.

Una de las cosas más interesantes del punto de no retorno es que un observador que lo rebase inadvertidamente no notaría inicialmente nada fuera de lo ordinario. No hay ninguna señal ni sirena que le advierta, ningún obstáculo que le detenga, nada que le avise del peligro inminente. En un instante todo parece estar bien, y en el instante siguiente todo sigue pareciendo bien. Pasar el punto de no retorno no es un acontecimiento.

Un renacuajo que se mueve libremente, llamémosle Alicia, flota hacia el desagüe cantando para su amigo Bernardo, que está lejos. Como sus ciegos colegas renacuajos, Alicia tiene un repertorio muy limitado. La única nota que puede cantar es un do natural, con una frecuencia de 262 ciclos por segundo —o en la jerga técnica, 262 hercios (Hz¹⁶). Mientras Alicia siga estando lejos del desagüe, su movimiento es casi imperceptible. Bernardo oye el sonido de la voz

¹⁶ El hercio, llamado así en honor del físico alemán del siglo XIX Heinrich Hertz, es una unidad de frecuencia. Un hercio es lo mismo que un ciclo por segundo.

de Alicia y siente un do. Pero cuando Alicia toma velocidad, el sonido se hace más grave; la pasa a si y luego a la. La causa de ello es el familiar efecto Doppler, que puede apreciarse cuando un tren veloz pasa haciendo sonar su silbato. Cuando el tren se acerca, el silbato suena para usted en un tono más alto que para el maquinista que va a bordo. Luego, cuando el silbato pasa y se aleja en la distancia, el sonido se hace más grave para usted. Cada oscilación sucesiva tiene que viajar un poco más que la anterior, y llega a sus oídos con un ligero retraso. El tiempo entre oscilaciones sonoras sucesivas se alarga, y usted oye una frecuencia más baja. Además, si el tren toma velocidad cuando se aleja, la frecuencia percibida se hace cada vez menor.

Lo mismo sucede con la nota musical de Alicia cuando se ve arrastrada hacia el punto de no retorno. Al principio Bernardo oye la nota a 262 Hz. Más tarde cambia a 200 Hz, luego a 100 Hz, 50 Hz y así sucesivamente. Un sonido emitido muy cerca del punto de no retorno tarda un tiempo extraordinariamente largo en escapar; el movimiento del agua prácticamente cancela el movimiento hacia fuera del sonido, y lo frena hasta casi detenerlo. Pronto el sonido se hace tan grave que, sin un equipo especial, Bernardo ya no puede oírlo.

Bernardo podría tener un equipo especial que le permita concentrar ondas sonoras y formar imágenes de Alicia cuando ella se acerca al punto de no retorno. Pero las sucesivas ondas sonoras tardan cada vez más tiempo en llegar a Bernardo, lo que hace que todo lo que concierne a Alicia parezca frenarse. Su voz se hace más grave, pero

eso no es todo; el movimiento de sus brazos se frena hasta casi pararse. De hecho, a Bernardo le parece que Alicia tarda un tiempo infinito en llegar al punto de no retorno.

Mientras tanto, Alicia no nota nada extraño. Ella rebasa felizmente el punto de no retorno sin ninguna sensación de frenarse o acelerarse. Sólo más tarde, cuando es arrastrada hacia las rocas mortales, se da cuenta del peligro. Vemos aquí una de las características clave de un agujero negro: diferentes observadores tienen paradójicamente diferentes percepciones de los mismos sucesos. Para Bernardo, al menos a juzgar por el sonido que oye, se necesita una eternidad para que Alicia llegue al punto de no retorno, pero para Alicia todo sucede en un abrir y cerrar de ojos.

Quizá ahora haya usted conjeturado que el punto de no retorno es algo análogo al horizonte de un agujero negro. Sustituya sonido por luz (recuerde que nada puede superar la velocidad de la luz), y tendrá una imagen bastante aproximada de las propiedades de un agujero negro de Schwarzschild. Como en el caso del desagüe, cualquier cosa que cruza el horizonte es incapaz de escapar, e incluso de permanecer en reposo. En el agujero negro el peligro no son las rocas abruptas sino la singularidad en el centro. Toda la materia dentro del horizonte será arrastrada hacia la singularidad, donde será estrujada hasta una presión y densidad infinitas.

Provistos de nuestra analogía del agujero mudo se aclaran muchas cosas paradójicas de los agujeros negros. Por ejemplo, consideremos a Bernardo, ahora ya no un renacuajo sino un astronauta en una estación espacial en órbita en torno a un agujero negro a una

distancia segura. Mientras, Alicia, está cayendo hacia el horizonte, sin cantar —no hay aire en el espacio exterior que transmita su voz— pero haciendo señales en su lugar con una linterna azul. Conforme ella cae, Bernardo ve que la frecuencia de la luz cambia del azul al rojo, al infrarrojo, a las microondas y finalmente a las radioondas de baja frecuencia. La propia Alicia parece aletargarse progresivamente hasta llegar prácticamente a la parálisis. Bernardo nunca la ve caer a través del horizonte; para él Alicia tarda un tiempo infinito en llegar al punto de no retorno. Pero en el sistema de referencia de Alicia, ella atraviesa el horizonte y sólo empieza a sentirse rara cuando se acerca a la singularidad.

El horizonte de un agujero negro de Schwarzschild está en el radio de Schwarzschild. Quizá Alicia está condenada cuando cruza el horizonte pero, como sucede con los renacuajos, aún le queda tiempo antes de ser destruida en la singularidad. ¿Cuánto tiempo? Eso depende del tamaño, o la masa, del agujero negro. Cuanto mayor es la masa, mayor es el radio de Schwarzschild y más tiempo tiene Alicia. Para un agujero negro con la masa del Sol, Alicia sólo tendría unos diez microsegundos. Para un agujero negro en el centro de una galaxia, que quizá tenga el tamaño de mil millones de masas solares, Alicia tendría mil millones de microsegundos, o aproximadamente media hora. Podríamos imaginar agujeros negros todavía más grandes, en los que Alicia podría pasar toda su vida, y quizá incluso podrían vivir y morir varias generaciones de la progenie de Alicia antes de que la singularidad las destruyera.

Por supuesto, según las observaciones de Bernardo, Alicia nunca llegará al horizonte. ¿Quién tiene razón? ¿Llega o no llega ella al horizonte? ¿Qué sucede realmente? ¿Hay un *realmente*? La física es, después de todo, una ciencia observacional y experimental, de modo que tendríamos que dar crédito a las observaciones de Bernardo aunque aparentemente están en conflicto con la descripción de los sucesos que hace Alicia. (Volveremos a Alicia y Bernardo en capítulos posteriores, después de que hayamos discutido las sorprendentes propiedades cuánticas de los agujeros negros descubiertas por Jacob Bekenstein y Stephen Hawking).

La analogía del desagüe está bien para muchos fines pero, como todas las analogías, tiene sus limitaciones. Por ejemplo, cuando un objeto atraviesa el horizonte, su masa se suma a la del agujero negro. El incremento de masa implica que el horizonte crece. Sin duda podríamos modelar esto en la analogía del desagüe acoplando una bomba al tubo de desagüe para controlar el flujo. Cada vez que algo entrara en el desagüe, la bomba se pondría en marcha durante un momento, acelerando el flujo y alejando un poco más el punto de no retorno. Pero el modelo pierde rápidamente su simplicidad¹⁷.

Otra propiedad de los agujeros negros es que ellos mismos son objetos móviles. Si se coloca un agujero negro en el campo gravitatorio de otra masa, será acelerado, igual que cualquier otra masa. Incluso puede caer dentro de un agujero negro más grande.

¹⁷ El profesor George Ellis me ha recordado una sutileza cuando el flujo es variable. En tal caso, el punto de no retorno no coincide exactamente con el punto en donde la velocidad del agua alcanza la velocidad del sonido. En el caso de los agujeros negros, la sutileza análoga es la diferencia entre un horizonte aparente y un horizonte verdadero.

Si tratáramos de representar todas estas propiedades de los agujeros negros reales, la analogía del desagüe sería más complicada que las matemáticas que se pretendía evitar. Pero pese a sus limitaciones, el desagüe es una imagen muy útil que nos permite entender propiedades básicas de los agujeros negros sin dominar las ecuaciones de la relatividad general.

Unas pocas fórmulas para quienes les gusten

He escrito este libro para el lector con poca inclinación matemática, pero para aquellos que disfrutan con las matemáticas, he aquí unas pocas fórmulas y su significado. Si a usted no le gustan, pase simplemente al próximo capítulo. No habrá un examen.

Según la ley de la gravedad de Newton, cualquier objeto en el universo atrae a cualquier otro objeto, con una fuerza gravitatoria *proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.*

$$F = \frac{mGM}{D^2}$$

Esta ecuación es una de las más famosas de la física, casi tan famosa como $E = mc^2$. (La famosa ecuación de Einstein que relaciona la energía, E , con la masa, m , y la velocidad de la luz, c). En el primer miembro está la fuerza, F , entre dos masas, tales como la Luna y la Tierra, o la Tierra y el Sol. En el segundo miembro la masa mayor es M , y la masa menor es m . Por ejemplo, la masa de la

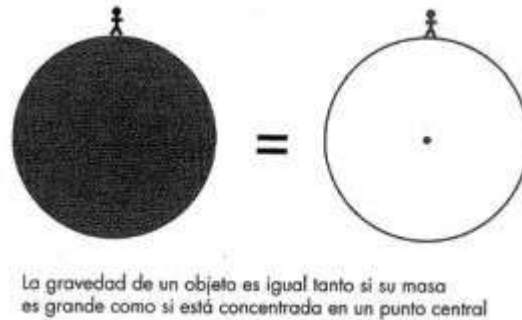
Tierra es 6×10^{24} kilogramos, y la de la Luna es 7×10^{22} kilogramos. La distancia entre las masas se denota por D . La distancia de la Tierra a la Luna es de unos 4×10^8 metros.

El último símbolo en la ecuación, G , es una constante numérica llamada *constante de Newton*. La constante de Newton no es algo que pueda deducirse a partir de puras matemáticas. Para encontrar su valor hay que medir la fuerza gravitatoria entre dos masas conocidas a una distancia conocida. Una vez hecho esto, se puede calcular la fuerza entre dos masas cualesquiera a cualquier distancia. Resulta irónico que Newton nunca supo cuál era el valor de su propia constante. Puesto que la gravedad es tan débil, G era tan pequeña que no pudo ser medida hasta finales del siglo XVIII. En esa época, un físico inglés llamado Henry Cavendish ideó una ingeniosa manera de medir fuerzas extraordinariamente pequeñas. Cavendish encontró que la fuerza entre un par de masas de un kilogramo separadas un metro es aproximadamente $6,7 \times 10^{-11}$ newtons. (El newton es la unidad de fuerza en el sistema métrico). Así, el valor de la constante de Newton, en unidades métricas, es:

$$G = 6,7 \times 10^{-11}.$$

A la hora de calcular las consecuencias de su teoría, Newton contó con una gran ventaja: las especiales propiedades matemáticas de la inversa del cuadrado. Cuando usted se pesa, parte de la fuerza gravitatoria que le atrae hacia la Tierra se debe a la masa que está justo por debajo de sus pies, otra parte se debe a la masa en el

interior profundo de la Tierra y otra parte procede de la masa del punto antipodal a unos 13.000 kilómetros. Pero por un milagro de las matemáticas, se puede suponer que toda la masa está concentrada en un único punto, precisamente en el centro geométrico del planeta.



Este hecho oportuno permitió a Newton calcular la velocidad de escape desde un objeto grande reemplazando la masa grande por una minúscula masa puntual. He aquí el resultado:

$$\text{Velocidad de escape} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

La fórmula muestra claramente que cuanto mayor es la masa, y menor es el radio, R , mayor es la velocidad de escape.

Ahora es un fácil ejercicio calcular el radio de Schwarzschild, R_S . Todo lo que tiene que hacer es poner la velocidad de la luz como velocidad de escape y resolver entonces la ecuación para el radio.

$$R_S = 2GM/c^2$$

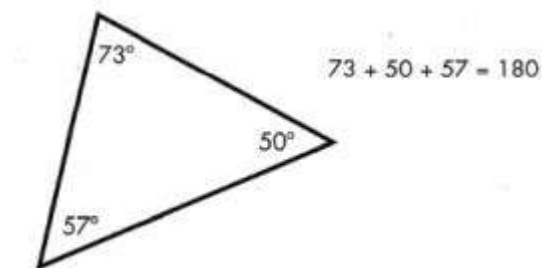
Advierta el hecho importante de que el radio de Schwarzschild es proporcional a la masa.

Esto es todo lo referente a estrellas oscuras, al menos al nivel que Laplace y Michell eran capaces de entenderlas.

Capítulo 3

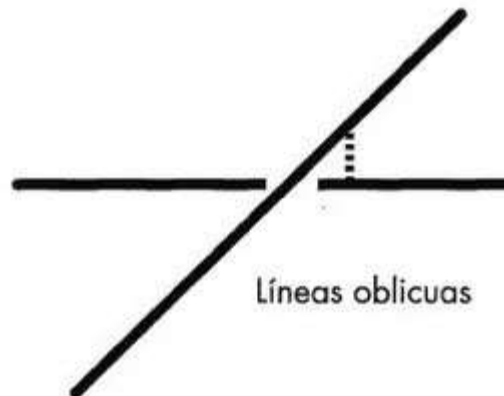
No es la geometría de su abuelo

En los viejos tiempos, antes de que matemáticos como Gauss, Bolyai, Lobachevski y Riemann¹⁸ enredaran con ella, geometría significaba geometría euclidiana, la geometría que todos aprendimos en el instituto. Primero venía la geometría plana, la geometría de una superficie bidimensional perfectamente lisa. Los conceptos básicos eran los de puntos, rectas y ángulos. Aprendíamos que tres puntos definen un triángulo, a menos que estén alineados; que las paralelas nunca se cortan; y que la suma de los ángulos de cualquier triángulo es 180 grados.



Más tarde, si usted siguió el mismo curso que yo, extendería sus poderes de visualización a tres dimensiones. Algunas cosas seguían siendo iguales que en dos dimensiones, pero otras tenían que cambiar, o no habría ninguna diferencia entre dos y tres dimensiones. Por ejemplo, hay líneas rectas en tres dimensiones que nunca se cortan pero que no son paralelas; se denominan oblicuas.

¹⁸ Carl Friedrich Gauss (1777-1855), János Bolyai (1802-1860), Nikolai Lobachevski (1792-1856) y Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866).



Ya sea en dos o en tres dimensiones, las reglas de la geometría seguían siendo las que Euclides estableció hacia el 300 a. C. Sin embargo, otros tipos de geometría —geometrías con axiomas diferentes— son posibles incluso en dos dimensiones.

La palabra *geometría* significa literalmente «medida de la Tierra». Resulta irónico que si Euclides se hubiera tomado la molestia de medir realmente triángulos en la superficie de la Tierra, habría descubierto que la geometría euclidiana no funciona. La razón es que la superficie de la Tierra es una esfera¹⁹, no un plano. La geometría esférica tiene ciertamente puntos y ángulos, pero no es tan obvio que tenga algo que nosotros llamaríamos líneas rectas. Veamos si podemos dar sentido a las palabras «línea recta en una esfera».

Una manera familiar de describir una línea recta en geometría euclidiana es decir que es la ruta más corta entre dos puntos. Si yo quisiera construir una línea recta en un campo de fútbol, clavaría

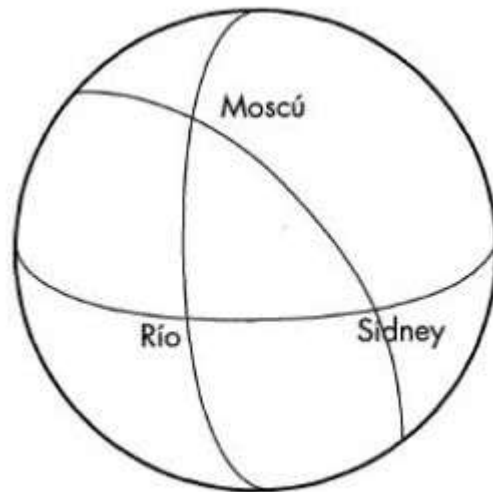
¹⁹ Por supuesto, me estoy refiriendo a una Tierra idealizada, perfectamente redonda.

dos estacas en el suelo y luego tendería entre ellas una cuerda lo más tensa posible. Tensando la cuerda aseguraríamos que la línea era lo más corta posible.



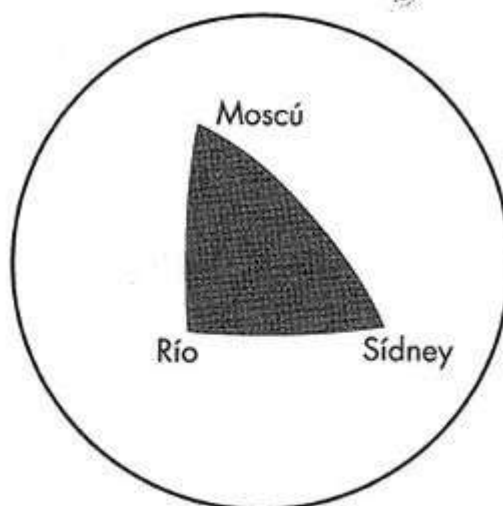
Esta idea de la ruta más corta entre dos puntos puede extenderse fácilmente a una esfera. Supongamos que nuestro objetivo es encontrar la ruta aérea más corta posible entre Moscú y Río de Janeiro. Necesitamos un globo, dos chinchetas y una cuerda. Colocando las chinchetas en Moscú y Río, podemos tensar la cuerda en la superficie del globo y determinar la ruta más corta. Estas rutas más cortas se denominan *círculos máximos*, tales como el ecuador y los meridianos. ¿Tiene sentido llamarles las líneas rectas de la geometría esférica? En realidad no importa cómo las llamemos. Lo importante es la relación lógica entre puntos, ángulos y líneas.

Siendo la distancia más corta entre dos puntos, dichas líneas son en cierto sentido las más rectas posibles en una esfera. El nombre matemático correcto para tales rutas es el de *geodésicas*. Mientras que las geodésicas en el espacio plano son líneas rectas ordinarias, las geodésicas en una esfera son círculos máximos.



Círculos máximos en una esfera

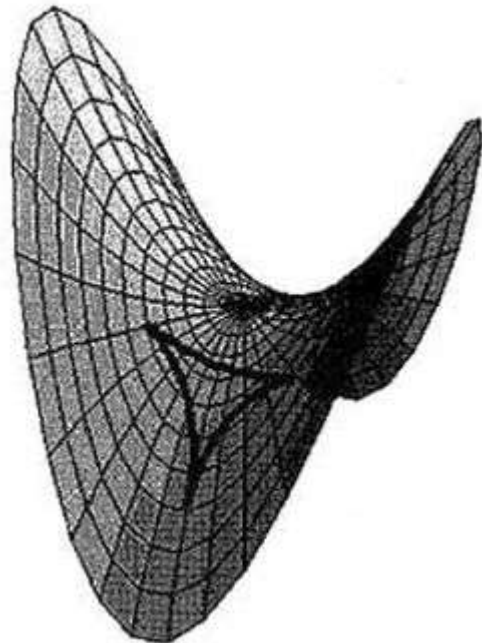
Con estos sustitutos esféricos de las líneas rectas, podemos pasar a construir triángulos. Escojamos tres puntos en la esfera —digamos Moscú, Río y Sidney. A continuación, tracemos las tres geodésicas que conectan los puntos dos a dos: la geodésica Moscú-Río, la geodésica Río-Sidney y finalmente la geodésica Sidney-Moscú. El resultado es un *triángulo esférico*.



Triángulo esférico

En geometría plana, si sumamos los ángulos de un triángulo obtenemos exactamente 180 grados. Pero mirando cuidadosamente el triángulo esférico, podemos ver que los lados se curvan y hacen el triángulo algo mayor que lo que sería en un plano. El resultado es que la suma de los ángulos de un triángulo esférico es siempre mayor que 180 grados. De una superficie cuyos triángulos tienen esta propiedad se dice que está *curvada positivamente*.

¿Puede haber superficies con la propiedad contraria, es decir, que la suma de los ángulos de un triángulo es menor que 180 grados? Un ejemplo de una superficie de este tipo es una silla de montar. Las superficies con forma de silla de montar están *curvadas negativamente*; en lugar de combarse, las geodésicas que forman un triángulo en una superficie curvada negativamente se aprietan.



De este modo, ya puedan nuestros limitados cerebros imaginar o no el espacio tridimensional curvado, sabemos cómo poner de manifiesto experimentalmente la curvatura. Los triángulos son la clave. Escojamos tres puntos cualesquiera en el espacio y tendamos cuerdas lo más tensas posibles para formar un triángulo

tridimensional. Si los ángulos suman 180 grados para cada uno de tales triángulos, el espacio es plano. Si no, está curvado.

Puede haber geometrías mucho más extrañas que esferas o sillas de montar: geometrías con colinas y valles irregulares que tienen regiones con curvatura positiva y regiones con curvatura negativa. Pero la regla para construir geodésicas siempre es simple. Imagínese arrastrándose en una superficie semejante y siguiendo siempre de frente, sin volver la cabeza. No mire alrededor; no piense de dónde viene ni a dónde va; tan sólo arrástrese hacia delante mirando lo que tiene delante de la nariz. Su trayectoria será una geodésica.

Imagine a un hombre en una silla de ruedas mecanizada que intenta navegar en un desierto de dunas arenosas. Tiene una reserva de agua limitada y debe salir rápidamente del desierto. Las colinas redondeadas, los pasadizos en forma de silla de montar y los valles profundos definen un terreno con curvatura positiva y negativa, y no es completamente obvio como orientar mejor la silla. El conductor razona que las altas colinas y los valles profundos le frenaran, de modo que al principio trata de rodearlos. El mecanismo de orientación es sencillo: si frena una de las ruedas con respecto a la otra, la silla girará en dicha dirección.

Pero al cabo de unas horas, el conductor empieza a sospechar que está pasando por las mismas zonas por las que ya había pasado. Orientar la silla le ha llevado a una peligrosa caminata aleatoria. Ahora comprende que la mejor estrategia es seguir absolutamente de frente, sin girar a la izquierda ni a la derecha. «Simplemente

sigue tu nariz», se dice. Pero ¿cómo estar seguro de que no está dando bandazos?

Pronto se hace obvia la respuesta. La silla de ruedas tiene un mecanismo que acopla las dos ruedas de modo que giran a la vez como unas pesas rígidas. Acoplando las ruedas de esta manera, el hombre consigue salir, directo hasta el límite del desierto.



En cada punto a lo largo de la trayectoria, el viajero parece ir en línea recta, pero visto en conjunto su trayectoria es una complicada línea ondulada. De todas formas, es lo más recta y corta posible.

Sólo en el siglo XIX empezaron los matemáticos a estudiar nuevos tipos de geometrías con axiomas alternativos. Algunos, tales como Georg Friedrich Bernhard Riemann, sostenían la idea de que la geometría «real» —la geometría del espacio real— quizá no fuera exactamente euclidiana. Pero el primero en tomar la idea en serio fue Einstein. En la teoría de la relatividad general, la geometría del espacio (o, más correctamente, del espacio-tiempo) se convirtió en una cuestión para experimentadores, no para filósofos y ni siquiera para matemáticos. Los matemáticos pueden decir qué tipos de geometrías son posibles, pero sólo la medida puede determinar la «verdadera» geometría del espacio.

Al elaborar la teoría de la relatividad general, Einstein incorporó la obra matemática de Riemann, quien había concebido geometrías más allá de esferas y superficies en forma de silla de montar; espacios con baches y abombamientos, donde algunas regiones estaban curvadas positivamente y otras negativamente; las geodésicas serpenteaban entre estos accidentes en trayectorias curvas irregulares. Riemann pensaba sólo en el espacio tridimensional, pero Einstein y su contemporáneo Herman Minkowski introdujeron algo nuevo: el tiempo como la *cuarta dimensión*. (Trate de visualizarlo. Si puede hacerlo, es que tiene un cerebro bastante inusual).

La teoría de la relatividad especial

Incluso antes de que Einstein empezara a pensar en un espacio curvo, Minkowski tuvo la idea de que el espacio y el tiempo deberían combinarse para formar un *espacio-tiempo* tetradimensional, y declaró de forma elegante, aunque algo pomposa, «En lo sucesivo, el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y sólo un tipo de unión entre ambos conservará una realidad independiente²⁰». La versión plana o no curvada de Minkowski para el espacio-tiempo llegó a conocerse como *espacio de Minkowski*.

²⁰ Minkowski fue el primero en darse cuenta de que una nueva geometría tetradimensional era el marco adecuado para la teoría de la relatividad especial de Einstein. La cita procede de «Espacio y Tiempo», una conferencia pronunciada en la 80.^a Asamblea de los Científicos Naturales y Médicos Alemanes el 21 de septiembre de 1908.

En una conferencia de 1908 ante la 80ª Asamblea de Científicos Naturales y Médicos Alemanes, Minkowski representó el tiempo como el eje vertical, y se sirvió de un solo eje horizontal para representar las tres dimensiones del espacio. La audiencia tenía que poner algo de imaginación.



Minkowski llamó *sucesos* a los puntos del espacio-tiempo. El uso común de la palabra *suceso* implica no sólo un tiempo y un lugar sino también algo que sucedió allí. Por ejemplo, «Un suceso de trascendental importancia tuvo lugar a las 5:29:45 a. m. del 16 de julio de 1945, en Trinidad, Nuevo México, cuando fue ensayada la primera bomba atómica». Minkowski pretendía un poco menos con su uso de la palabra *suceso*. Sólo quería especificar un tiempo y un lugar determinados, independientemente de si algo sucedió allí realmente. Lo que él quería decir era *un lugar y un tiempo donde un suceso podría o no suceder*, pero eso era un poco largo, de modo que simplemente le llamó *suceso*.

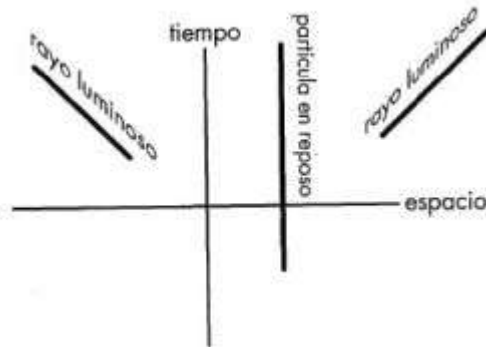
Las líneas rectas o curvas a través del espacio-tiempo desempeñan un papel especial en el espacio de Minkowski. Un punto en el espacio representa la posición de una partícula Pero para dibujar el

movimiento de una partícula en el espacio-tiempo se traza una línea recta o curva que barre una trayectoria llamada una *línea de universo*. Es inevitable algún tipo de movimiento. Incluso si la partícula está en perfecto reposo, viaja de todas formas a través del tiempo. La trayectoria de semejante partícula en reposo sería una línea recta vertical. La trayectoria de una partícula que se mueve hacia la derecha sería una línea de universo inclinada a la derecha.



Del mismo modo, una línea de universo inclinada hacia la izquierda describiría a una partícula que se mueve hacia la izquierda. Cuanto mayor es la inclinación respecto a la vertical, más rápidamente se está moviendo la partícula. Minkowski representaba el movimiento de los rayos luminosos —los más rápidos de todos los objetos— por líneas inclinadas 45° . Puesto que ninguna partícula puede moverse a más velocidad que la luz, la trayectoria de un objeto real nunca puede inclinarse más de 45° respecto a la vertical.

Minkowski llamó *de-tipo-tiempo* a la línea de universo de una partícula que se mueve más lenta que la luz, porque está más cerca de la vertical. Llamó *de-tipo-luz* a las trayectorias de los rayos luminosos inclinadas 45° .



Tiempo propio

El concepto de distancia es bastante fácil de entender para el cerebro humano. Es especialmente fácil cuando la distancia se mide a lo largo de una recta. Para medirla sólo se necesita una regla ordinaria. Medir distancias a lo largo de una curva es un poco más complicado, aunque no demasiado. Simplemente reemplazamos la regla por una cinta métrica flexible. Sin embargo, las distancias en el espacio-tiempo son más sutiles, y no es inmediatamente obvio cómo hay que medirlas. De hecho, no existía tal concepto hasta que Minkowski lo inventó.

Minkowski estaba particularmente interesado en definir el concepto de distancia a lo largo de una línea de universo. Por ejemplo, tomemos la línea de universo de una partícula en reposo. Puesto que la trayectoria no cubre ninguna distancia espacial, una regla o una cinta métrica no serían herramientas apropiadas para medirla. Pero, como advirtió Minkowski, incluso un objeto en perfecto reposo se mueve en el tiempo. La forma correcta de medir su línea de

universo no es con una regla sino con un reloj. Llamó *tiempo propio* a la nueva medida de distancia en la línea de universo.

Imagine que todo objeto lleva consigo un pequeño reloj, donde quiera que vaya, igual que una persona podría llevar un reloj de bolsillo. El tiempo propio entre dos sucesos a lo largo de una línea de universo es la cantidad de tiempo transcurrido entre los dos sucesos, medido por el reloj que se mueve a lo largo de la línea de universo. Los tics del reloj son análogos a las marcas de tinta en la cinta métrica, pero en lugar de medir la distancia ordinaria, miden el tiempo propio de Minkowski.

He aquí un ejemplo concreto. El señor Tortuga y el señor Liebre deciden hacer una carrera por Central Park. Hay árbitros apostados en cada extremo con relojes cuidadosamente sincronizados de forma que puedan cronometrar al ganador. Los corredores parten exactamente a las 12:00 p. m. A mitad de camino, Liebre va tan adelantado que decide tomarse un descanso antes de continuar, pero se queda dormido y se despierta justo a tiempo de ver como Tortuga se acerca a la meta. Desesperado, y para no perder la carrera, sale disparado y consigue alcanzar a Tortuga para cruzar la meta al mismo tiempo.

Tortuga saca su reloj de bolsillo altamente fiable y muestra orgulloso ante la multitud congregada que el tiempo propio, a lo largo del segmento de su línea de universo desde la salida a la llegada, es de 2 horas y 56 minutos. Pero ¿por qué el nuevo término *tiempo propio*? ¿Por qué Tortuga no dice simplemente que su tiempo

entre la salida y la llegada era de 2 horas y 56 minutos? ¿No es el tiempo sólo tiempo?

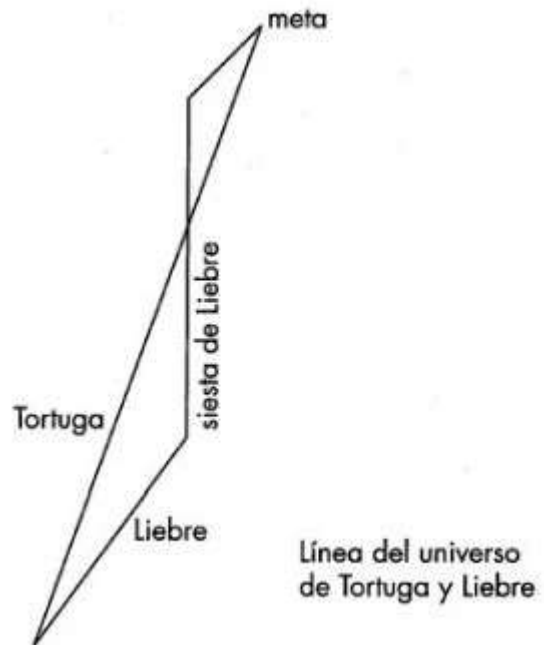
Ciertamente Newton así lo pensaba. Él creía que el reloj maestro de Dios definía un flujo de tiempo universal y que todos los relojes podían sincronizarse con él. Para representar el tiempo universal de

Newton imaginemos que el espacio está lleno de pequeños relojes que han sido sincronizados. Todos son relojes buenos y honestos que marchan al mismo ritmo, de modo que una vez que todos han sido sincronizados, siguen sincronizados.

Donde quiera que se encuentren Tortuga y Liebre, pueden comprobar el tiempo mirando el reloj que haya en su inmediata vecindad. O pueden

mirar sus propios relojes de bolsillo. Para Newton era un axioma que, no importa donde fuera uno, a cualquier velocidad, a lo largo de una línea recta o curva, su reloj de bolsillo —suponiendo que fuera también un reloj bueno y honesto— coincidiría con el reloj local en su vecindad. El tiempo newtoniano tiene una realidad absoluta; no hay nada relativo en ello.

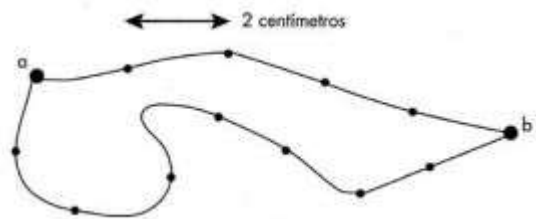
Pero en 1905 Einstein jugó con el tiempo absoluto de Einstein. Según la teoría de la relatividad especial, los ritmos a los que marchan los relojes dependen de cómo se mueven, incluso si son réplicas perfectas unos de otros. En situaciones ordinarias los



efectos son imperceptibles, pero cuando los relojes se mueven a velocidades próximas a la de la luz, los efectos se hacen muy notables. Según Einstein, cada reloj que se mueve a lo largo de su propia línea de universo marca su propio ritmo. Por ello, Minkowski se vio llevado a definir el nuevo concepto de tiempo propio.

Para ilustrar el punto, cuando Liebre saca su reloj (también un reloj bueno y honesto), el tiempo propio de su línea de universo muestra 1 hora y 36 minutos²¹. Aunque empezaron y terminaron en los mismos puntos espacio-temporales, las líneas de universo de Tortuga y de Liebre tienen tiempos propios muy diferentes.

Antes de seguir discutiendo el tiempo propio, es instructivo pensar un poco más en la distancia



ordinaria medida con una cinta métrica a lo largo de una curva. Tomemos dos puntos en el espacio y tracemos una curva entre ellos. ¿A qué distancia, a lo largo de la curva, están los puntos? Obviamente, la respuesta depende de la curva. He aquí dos curvas que conectan los dos mismos puntos (a y b) con longitudes muy diferentes. A lo largo de la curva superior la distancia entre los puntos a y b es de diez centímetros; a lo largo de la curva inferior es de quince centímetros.

Por supuesto, no hay nada sorprendente en el hecho de que curvas diferentes entre a y b tengan longitudes diferentes.

²¹ Ésta es una exageración extrema, que habría requerido que Liebre se moviera a una velocidad próxima a la de la luz.

Volvamos ahora al problema de medir líneas de universo en el espacio-tiempo. He aquí una imagen de una típica línea de universo. Note que la línea de universo es curva. Eso significa que la velocidad a lo largo de la trayectoria no es uniforme. En este ejemplo concreto, una partícula que se movía rápidamente se frena. Los puntos indican los tics del reloj. Cada intervalo corresponde a un segundo.

Note que los segundos parecen pasar más lentamente cuando el ángulo está más cerca de la horizontal. Esto no es un error; representa el famoso descubrimiento por parte de Einstein de la *dilatación temporal*; los relojes que se mueven rápidamente marchan lentamente comparados con relojes que se mueven lentos o están en reposo.

Consideremos dos líneas de universo curvas que conectan dos sucesos. Einstein, buen experimentador mental, imaginó dos gemelos —yo les llamaré Alicia y Bernardo— nacidos en el mismo instante. El suceso de su nacimiento es etiquetado como a. En el momento de nacer, los gemelos son separados; Bernardo permanece en casa, y Alicia es separada de él a una tremenda velocidad. Al cabo de un tiempo, Einstein hace que Alicia gire y la encamina de vuelta a casa. Finalmente, Bernardo y Alicia se encuentran de nuevo en b.

Cuando nacieron, Einstein dio a los gemelos idénticos relojes de bolsillo, que están perfectamente sincronizados. Cuando Bernardo y

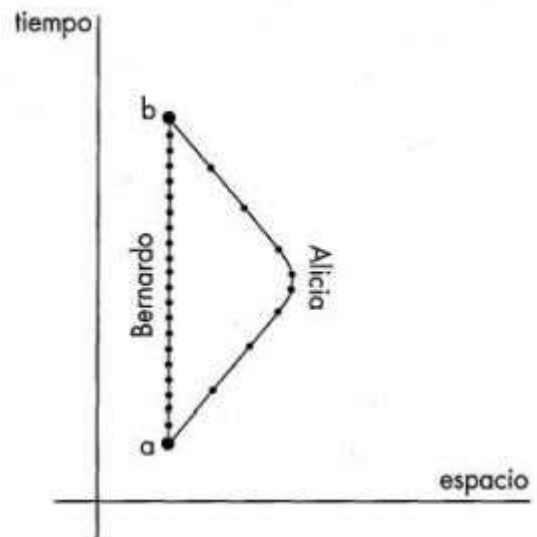


Alicia se encuentran finalmente en b, comparan sus relojes y descubren algo que habría sorprendido a Newton. Para empezar, Bernardo tiene una larga barba gris, mientras que Alicia es la imagen de la juventud. Según sus relojes de bolsillo, el tiempo propio a lo largo de la línea de universo de Alicia es mucho menor que a lo largo de la de Bernardo. Del mismo modo que la distancia ordinaria entre dos puntos depende de la curva que los conecta, el tiempo propio entre dos sucesos depende de la línea de universo que los conecta.

¿Advirtió Alicia que su reloj marchaba más lentamente durante su viaje? En absoluto. Su reloj no

era la única cosa que iba lenta; también lo hacían su ritmo cardiaco, su actividad cerebral, y todo su metabolismo. Durante su viaje, Alicia no tenía nada con que comparar su reloj, pero cuando finalmente volvió a encontrar a Bernardo, ella descubrió que era apreciablemente más joven que él. Esta «paradoja de los gemelos» ha intrigado a los estudiantes de física durante más de cien años.

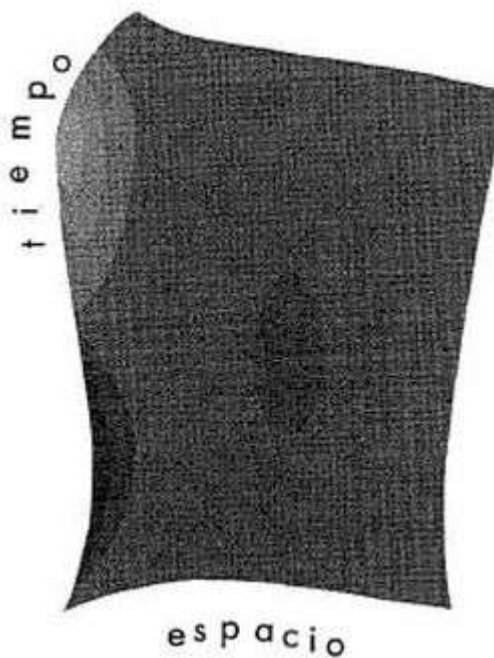
Hay una curiosidad que quizá haya descubierto usted mismo. Bernardo viaja a través del espacio en una línea recta, mientras que Alicia viaja en una trayectoria curva. Pero el tiempo propio a lo largo de la trayectoria de Alicia es menor que a lo largo de la de Bernardo. Éste es un ejemplo de un hecho contraintuitivo acerca de la



geometría del espacio de Minkowski: una línea de universo recta tiene el máximo tiempo propio entre dos sucesos. Póngalo en su kit de recableado.

La teoría de la relatividad general

Como Riemann, Einstein creía que la geometría era curva y variable. Él se estaba refiriendo no sólo al espacio sino a la geometría del espacio-tiempo. Siguiendo a Minkowski, dejó un eje para representar el tiempo y otro para las tres dimensiones del espacio, pero en lugar de imaginar el espacio-tiempo como un plano liso, lo imaginó como una superficie alabeada, con baches y abombamientos. Las partículas seguían moviéndose a lo largo de líneas de universo y los relojes seguían marcando el tiempo propio, pero la geometría del espacio-tiempo era mucho más irregular.



Las leyes de Einstein

Sorprendentemente, en muchos aspectos las leyes de la física son más simples en el espacio-tiempo curvo que en la física newtoniana. Tomemos, por ejemplo, el movimiento de las partículas. Las leyes de Newton empiezan con el principio de inercia:

En ausencia de fuerzas, todo objeto permanecerá en estado de movimiento uniforme.

Esta regla, que suena simple, con la expresión «movimiento uniforme», esconde dos ideas separadas. En primer lugar, movimiento uniforme significa movimiento en línea recta en el espacio. Pero Newton quería decir algo más fuerte: movimiento uniforme implica también velocidad constante, es decir, ausencia de aceleración²².

Pero ¿qué pasa con las fuerzas gravitatorias? Newton añadió una segunda ley —una ley para el movimiento no uniforme— que dice que fuerza es igual a masa por aceleración, o dicho de otra forma:

La aceleración de un objeto es la fuerza ejercida sobre el objeto dividida por su masa.

Una tercera regla se aplica cuándo la fuerza es debida a la gravedad:

²² El término *aceleración* se refiere a cualquier cambio en la velocidad, incluido el frenado que normalmente llamamos *deceleración*. Para un físico, *deceleración* es simplemente aceleración negativa.

La fuerza gravitatoria sobre cualquier objeto es proporcional a su masa.

Minkowski simplificó la noción de movimiento uniforme de Newton con una idea ingeniosa que resumía ambas condiciones:

En ausencia de fuerzas, todo objeto se mueve a través del espacio-tiempo siguiendo una línea de universo recta.

La rectitud de una línea de universo implica no sólo rectitud en el espacio sino también velocidad constante.

La hipótesis de línea de universo recta de Minkowski era una bella síntesis de los dos aspectos del movimiento uniforme, pero aplicada sólo en completa ausencia de fuerzas. Einstein llevó la idea de Minkowski a otro nivel cuando la aplicó al espacio-tiempo curvo.

La nueva ley de movimiento de Einstein era desconcertantemente simple. En todo punto a lo largo de su línea de universo, una partícula hace la cosa más simple posible: sigue hacia adelante (en el espacio-tiempo). Si el espacio-tiempo es plano, la ley de Einstein es la misma que la de Minkowski; pero si el espacio-tiempo es curvo —en regiones donde cuerpos masivos curvan y alabean el espacio-tiempo— la nueva ley anima a las partículas a moverse a lo largo de geodésicas espacio-temporales.

Como Minkowski había explicado, una línea de universo curva indica que sobre el objeto está actuando una fuerza. Según la nueva ley de Einstein, las partículas en un espacio-tiempo curvo se mueven tan rectas como pueden, pero las geodésicas se curvan

inevitablemente para ajustarse al terreno espacio-temporal local. Las ecuaciones matemáticas de Einstein demuestran que una geodésica en el espacio-tiempo curvo se comporta exactamente igual que la línea de universo curva de una partícula que se mueve en un campo gravitatorio. La fuerza gravitatoria no es otra cosa que la curvatura de las líneas de las geodésicas en un espacio-tiempo curvo.

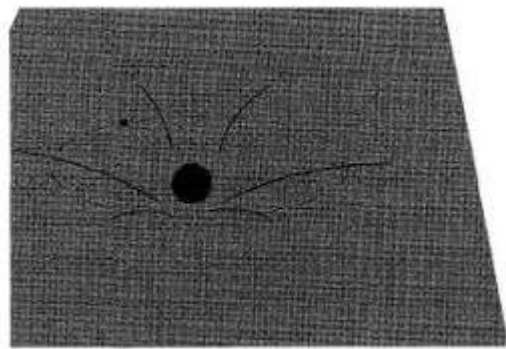
En una ley casi risiblemente sencilla, Einstein combinó las leyes de movimiento de Newton con la hipótesis de Minkowski de línea de universo y explicó cómo actúa la gravedad sobre todos los objetos. Lo que Newton había considerado un hecho inexplicable de la Naturaleza —las fuerzas gravitatorias— Einstein lo explicaba como efecto de una geometría espacio-temporal no euclidiana.

El principio de que las partículas se mueven a lo largo de geodésicas proporcionaba una poderosa y nueva forma de considerar la gravedad, pero no decía nada sobre la causa de la curvatura. Para completar su teoría, Einstein tenía que explicar qué es lo que controla los alabeos y otras irregularidades del espacio-tiempo. En la vieja teoría newtoniana, la fuente del campo gravitatorio era la masa; la presencia de una masa tal como el Sol crea un campo gravitatorio a su alrededor, que a su vez influye en el movimiento de los planetas. Por ello era natural que Einstein conjeturara que la presencia de masa —o equivalentemente de energía— hace que el espacio tiempo se curve o distorsione. John Wheeler, uno de los grandes pioneros y maestros de la moderna teoría relativista, lo resumió en un conciso eslogan: «El espacio dice a los cuerpos cómo

deben moverse, y los cuerpos dicen al espacio cómo debe curvarse». (Él quería decir espacio-tiempo).

La nueva idea de Einstein significa que el espacio-tiempo no es pasivo; tiene propiedades, tales como la curvatura, que responden a la presencia de masas. Es casi como si el espacio-tiempo fuera un material elástico, o incluso un fluido, que puede ser afectado por los objetos que se mueven en él.

La relación entre objetos, masivos, gravedad, curvatura y el movimiento de las partículas se describe a veces mediante una analogía sobre la que tengo sentimientos encontrados. La idea consiste en considerar el



espacio como una lámina elástica horizontal, parecida a una cama elástica. Cuando no hay masas que la deformen, la lámina permanece plana. Pero coloquemos sobre la lámina una masa pesada tal como una bola de bolos, y el peso de la bola la deformará. Añadamos ahora una bola mucho más pequeña, una canica, por ejemplo —observaremos cómo la canica cae hacia la bola más pesada—. También puede darse a la canica una velocidad tangencial para que orbite en torno a la masa más grande, igual que la Tierra orbita en torno al Sol. La depresión en la superficie impide que la masa pequeña se escape, igual que la gravedad del Sol retiene a la Tierra.

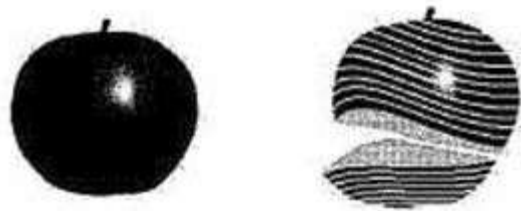
Hay algunas cosas confusas en esta analogía. Para empezar, la curvatura de la lámina elástica es curvatura espacial, no curvatura

espacio-temporal. No explica los efectos peculiares que tienen las masas sobre relojes cercanos (veremos dichos efectos más adelante en este capítulo). Y lo que es peor, el modelo utiliza la gravedad para explicar la gravedad. Es la atracción de la Tierra real sobre la bola de bolos la que provoca la depresión en la superficie elástica. En un sentido técnico, el modelo de la lámina elástica es equivocado.

Sin embargo, la analogía capta algo del espíritu de la relatividad general. El espacio-tiempo es deformable, y las masas pesadas lo deforman. El movimiento de los objetos pequeños es afectado por la curvatura creada por los objetos pesados. Y la lámina elástica deprimida se parece mucho a los diagramas matemáticos de inserción que pronto explicaré. Utilice la analogía si le ayuda, pero tenga en cuenta que es sólo una analogía.

Agujeros negros

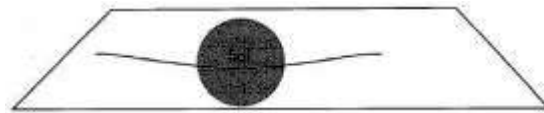
Tome una manzana y córtela por la mitad. La manzana es tridimensional pero la sección recién expuesta es bidimensional. Si usted apila todas las secciones bidimensionales obtenidas haciendo rebanadas muy finas de la manzana, puede reconstruir la manzana. Se podría decir que cada fina rebanada está *insertada* en la pila de rebanadas de dimensión más alta.



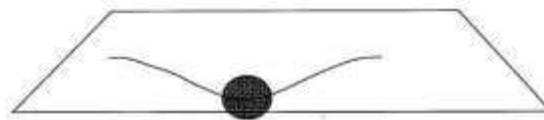
El espacio-tiempo es tetradimensional, pero al rebanarlo podemos mostrar rebanadas tridimensionales de espacio. Puede visualizarse como una pila de finas rebanadas, cada una de las cuales

representa el espacio tridimensional en un instante de tiempo. Visualizar tres dimensiones es mucho más fácil que visualizar cuatro. Las imágenes de las rebanadas se denominan *diagramas de inserción*, y ayudan a dar una imagen intuitiva de la geometría curva.

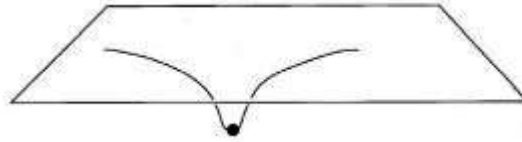
Tomemos el caso de la geometría creada por la masa del Sol. Olvidemos el tiempo por el momento y centrémonos en visualizar el espacio curvo en la vecindad del Sol. El diagrama de inserción parece una suave depresión en una lámina elástica, centrada en el Sol, más o menos similar a la cama elástica sobre la que hay una bola de bolos.



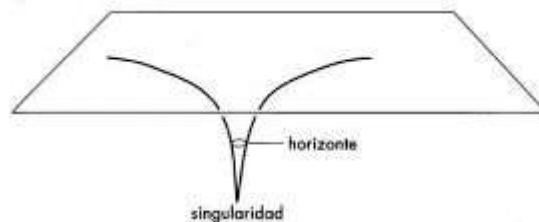
La distorsión cerca del Sol sería más pronunciada si la misma masa estuviera concentrada en un volumen menor.



La geometría cerca de una enana blanca o de una estrella de neutrones es incluso más curva, aunque sigue siendo suave.



Como vimos antes, si la estrella que colapsa se hace suficientemente pequeña para estar contenida dentro de su radio de Schwarzschild (tres kilómetros en el caso del Sol), entonces, igual que los renacuajos atrapados en el desagüe, las partículas del Sol serán atraídas irresistiblemente y colapsarán hasta formar una singularidad: un punto de curvatura infinita²³.



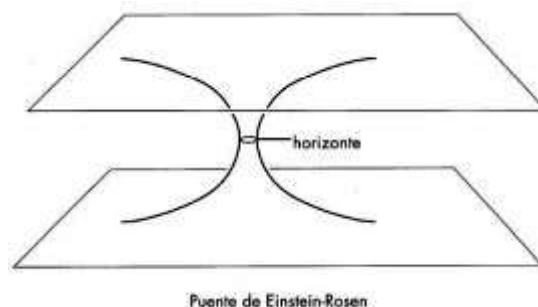
Lo que no son los agujeros negros

Me temo que esta sección pueda generar algún correo airado de parte de lectores cuyo conocimiento de los agujeros negros procede únicamente de la película de Disney *El Abismo Negro*. No quiero ser un aguafiestas —el Señor sabe que los agujeros negros son objetos fascinantes— pero los agujeros negros no son puertas al cielo ni al infierno ni a otros universos, ni siquiera túneles que terminan en nuestro propio universo. Puesto que todo vale en el amor, la guerra

²³ Nota para los expertos: el diagrama de inserción que sigue no está en tiempo de Schwarzschild constante. Se obtiene utilizando coordenadas de Kruskal y escogiendo la superficie $T=1$.

y la ciencia ficción, no me preocupa realmente que los cineastas se vayan por esos derroteros. Pero para entender los agujeros negros hace falta algo más que un cuidadoso estudio de las películas de serie B.

La premisa de *El Abismo Negro* se inspiraba originalmente en el trabajo de Einstein con su colaborador Nathan Rosen, más tarde divulgado por John Wheeler. Einstein y Rosen especularon con que el interior de un agujero negro podría conectarse con un lugar muy lejano, a través de lo que Wheeler llamaría más tarde un *agujero de gusano*. La idea era que dos agujeros negros, quizá separados por una distancia de miles de millones de años luz, podrían unirse por sus horizontes y formar un fantástico atajo a través del universo. En lugar de terminar en una abrupta singularidad, el diagrama de inserción del agujero negro, una vez pasado el horizonte, se abriría a otra gran región del espacio-tiempo.



Entrar por un extremo y salir por el otro sería como entrar en un túnel en Nueva York y emerger, después de no más de tres kilómetros, en Pekín, o incluso en Marte. El agujero de gusano de Wheeler se basaba en genuinas soluciones matemáticas de la teoría de la relatividad general.

Ese es el origen de la leyenda urbana de que los agujeros negros son túneles a otros mundos. Pero hay dos cosas erróneas en esta fantasía. La primera es que el agujero de gusano de Wheeler sólo puede permanecer abierto durante un corto intervalo de tiempo, y luego se estrangula. El agujero de gusano se abre y se cierra tan rápido que es imposible que algo lo atraviese, incluida la luz. Es como si el corto túnel a Pekín se colapsara antes de que nadie pudiese atravesarlo. Algunos físicos han especulado que la mecánica cuántica podría estabilizar de algún modo el agujero de gusano, pero no hay ninguna prueba de ello.

Y lo que es más pertinente, Einstein y Rosen estaban estudiando un «agujero negro eterno»: un agujero que existe no sólo en el futuro infinito sino también en el pasado infinito. Pero ni siquiera el universo es infinitamente viejo. Los agujeros negros reales tienen su origen casi con seguridad en el colapso de estrellas (u otros objetos masivos) que tuvieron lugar mucho después del *Big Bang*. Cuando las ecuaciones de Einstein se aplican a la formación de agujeros negros, los agujeros negros sencillamente no tienen agujeros de gusano unidos a ellos. El diagrama de inserción se parece al de las páginas 72-73.

Ahora que le he estropeado el día, le sugiero que alquile la película y se divierta.

Cómo construir una máquina del tiempo

El futuro ya no es lo que era.

YOGI BERRA

¿Qué hay sobre las máquinas del tiempo, otro ingrediente habitual de la ciencia ficción y tema de numerosos libros, programas de televisión y películas? A mí me gustaría tener una. Tengo gran curiosidad por saber cómo será el futuro. ¿Habrá seres humanos dentro de un millón de años? ¿Colonizarán el espacio? ¿Seguirá siendo el sexo el método preferido de procreación? Me gustaría saberlo, y sospecho que a usted también.

Tenga cuidado con lo que desea. Habría algunos inconvenientes en viajar al futuro. Todos sus amigos y familiares habrían muerto hace tiempo. Su vestimenta parecería ridícula. Su lenguaje sería inútil. En resumen, usted sería un monstruo. Un viaje de ida al futuro parece algo deprimente, si no trágico.

No hay problema. No tiene más que saltar a su máquina del tiempo y ajustar los mandos para volver al presente. Pero ¿qué pasa si la transmisión de su máquina del tiempo no tiene marcha atrás? ¿Qué pasa si sólo pudiera ir hacia delante? ¿Iría usted a pesar de todo? Podría pensar que ésta es una pregunta retórica; todo el mundo sabe que las máquinas del tiempo son ciencia ficción. Pero en realidad no es cierto.

Las máquinas de sólo ida hacia el futuro son muy posibles, al menos en principio. En la película de Woody Allen *El Dormilón*, el protagonista se ve transportado a doscientos años en el futuro mediante una técnica que hoy es casi posible. Simplemente ha sido congelado en un estado de animación suspendida, algo que ya se ha

hecho con perros y cerdos durante algunas horas. Cuando despierta de su estado congelado, él está en el futuro.

Por supuesto, esa técnica no es realmente una máquina del tiempo. Puede frenar el metabolismo de una persona, pero no frena el movimiento de los átomos y otros procesos físicos. Pero podemos hacerlo mejor. ¿Recuerda a los gemelos, Bernardo y Alicia, que fueron separados al nacer? Cuando Alicia regresa de su viaje por el espacio, encuentra que el resto del mundo ha envejecido mucho más que ella. Así, un viaje de ida y vuelta en una nave espacial muy veloz es un ejemplo de viaje en el tiempo.

Un gran agujero negro sería otra máquina del tiempo muy práctica. Así es como funciona. Para empezar, usted necesitaría una estación espacial orbital y un largo cable para descender hasta la vecindad del horizonte. Usted no querría acercarse mucho, y desde luego no querría atravesar el horizonte, de modo que el cable debería ser muy resistente. Una polea en la estación espacial le bajaría y, al cabo de un tiempo convenido, volvería a subirle.

Digamos que usted quisiera ir a dos mil años en el futuro, y estuviera dispuesto a pasar un año suspendido en el cable sin demasiadas incomodidades por causa de la aceleración gravitatoria. Podría hacerse, pero habría que encontrar un agujero negro con un horizonte casi tan grande como nuestra galaxia. Si a usted no le importa pasar incomodidades, podría hacerlo con el agujero negro mucho más pequeño en el centro de nuestra galaxia. El inconveniente sería que usted tendría la sensación de pesar cinco mil millones de kilogramos durante ese año que pasara cerca del

horizonte. Después de un año en el cable, usted sería izado para descubrir que había pasado un milenio. En principio, al menos, los agujeros negros son máquinas del tiempo para el futuro.

Pero ¿qué hay sobre volver atrás? Para eso usted necesitaría una máquina del tiempo al pasado. Lamentablemente, ir hacia atrás en el tiempo es probablemente imposible. A veces los físicos especulan sobre el viaje en el tiempo al pasado atravesando agujeros de gusano cuánticos, pero volver en el tiempo siempre lleva a contradicciones lógicas. Mi conjetura es que usted se quedaría atrapado en el futuro, y no podría hacer nada por remediarlo.

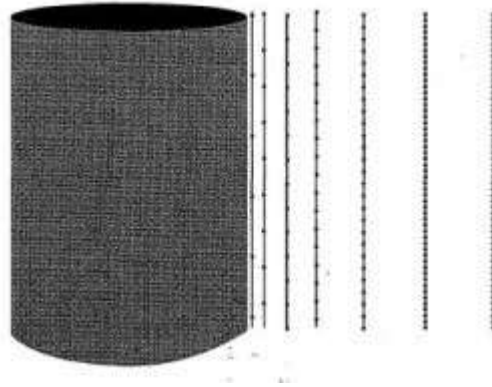
Frenado gravitatorio de relojes

¿Qué hay en los agujeros negros que les hace máquinas del tiempo? La respuesta es que producen una fuerte distorsión de la geometría del espacio-tiempo que producen. La distorsión afecta al flujo del tiempo propio a lo largo de líneas de universo de formas diferentes, dependiendo de dónde estén localizadas las líneas de universo. Lejos de un agujero negro su influencia es muy débil, y el flujo de tiempo propio no es prácticamente alterado por su presencia. Pero un reloj suspendido de un cable justo por encima del horizonte se frenaría mucho por la distorsión del espacio-tiempo. De hecho, todos los relojes, incluido su propio ritmo cardíaco, su metabolismo e incluso el movimiento interno de los átomos, se frenaría. Usted no lo advertiría en lo más mínimo, pero cuando regresara a la estación espacial y comparara su reloj con los relojes que permanecieron a

bordo, advertiría la discrepancia. Habría pasado más tiempo en la estación espacial que en su reloj.

En realidad, ni siquiera sería necesario regresar a la estación espacial para ver los efectos del agujero negro sobre el tiempo. Si usted, suspendido cerca del horizonte, y yo, en la estación espacial, tuviéramos telescopios, podríamos observarnos mutuamente. Yo le vería a usted y su reloj a cámara lenta, mientras que usted me vería acelerado como en una vieja película de los Keystone Kops. Este frenado relativo del tiempo cerca de una masa pesada se denomina *desplazamiento hacia el rojo gravitatorio*. Descubierta por Einstein como consecuencia de su teoría de la relatividad general, no sucede en la teoría gravitatoria de Newton, en la que todos los relojes marchan exactamente al mismo ritmo.

La siguiente imagen espacio-temporal ilustra el desplazamiento hacia el rojo gravitatorio cerca del horizonte de un agujero negro. El objeto de la izquierda es el agujero negro. Recuerde que la imagen representa el espacio-tiempo, con el eje vertical como tiempo. La superficie gris es el horizonte, y las líneas verticales a diversas distancias del horizonte representan un grupo de relojes idénticos en reposo. Las marcas representan el flujo de tiempo propio a lo largo de las líneas de universo. Las unidades no son importantes; podrían representar segundos, nanosegundos o años. Cuanto más próximo está el reloj al horizonte del agujero negro, más lento parece marchar. En el mismo horizonte, el tiempo llega a detenerse por completo para los relojes que permanecen fuera del agujero negro.



El frenado gravitatorio de los relojes sucede en circunstancias menos exóticas que en la proximidad del horizonte de un agujero negro. Una tibia versión del mismo sucede en la superficie del Sol. Los átomos son relojes en miniatura —los electrones zumban alrededor del núcleo como las manecillas de un reloj—. Cuando se observan desde la Tierra, los átomos en el Sol parecen marchar un poco más lentos.

La pérdida de simultaneidad, la paradoja de los gemelos, el espacio-tiempo curvo, los agujeros negros, las máquinas del tiempo... tantas ideas más-extrañas-que-la-ficción, son ahora conceptos fiables y no controvertidos en los que todos los físicos están de acuerdo. Se necesitó un doloroso recableado —geometría diferencial, cálculo tensorial, métrica espacio-temporal, formas diferenciales— para entender la nueva física del espacio-tiempo. Pero incluso la difícil transición al dominio cuántico de *Alicia en el País de las Maravillas* no era nada comparado con las dificultades conceptuales que nos desconciertan ahora cuando tratamos de reconciliar la relatividad general con la mecánica cuántica. Como en tiempos pasados,

parecía como si la mecánica cuántica no pudiera coexistir con la teoría de la gravedad de Einstein y tuviera que ser abandonada. Pero quizá se podría decir que la guerra de los agujeros negros era «La guerra que puso el mundo a salvo de la mecánica cuántica».

En el próximo capítulo intentaré la tarea imposiblemente quijotesca de recablearle para la mecánica cuántica, más o menos sin ecuaciones. Las herramientas reales para grokar el universo cuántico son matemáticas abstractas: espacios de Hilbert de dimensión infinita, operadores de proyección, matrices unitarias, y muchos otros principios avanzados cuyo aprendizaje requiere varios años. Pero veamos cómo lo hacemos en sólo unas páginas.

Capítulo 4

«Einstein, no le digas a Dios lo que tiene que hacer»



Había una mesa dispuesta bajo un árbol delante de la casa, y la Liebre de Marzo y el Sombrerero estaban tomando el té. Un Lirón estaba sentado entre ellos, profundamente dormido, y los otros dos lo estaban utilizando como cojín, descansando los codos en él, y hablando por encima de su cabeza «Muy incómodo para el Lirón», pensó Alicia; «aunque, como está dormido, supongo que no importa».

Desde su última clase de ciencias, Alicia se había sentido profundamente intrigada por algo, y esperaba que una de sus nuevas amistades pudiera enmendar la confusión. Dejó sobre la mesa su taza de té y preguntó con voz tímida, «¿La luz está hecha de ondas o de partículas?». «Sí, exactamente», respondió el Sombrerero Loco. Algo irritada, Alicia preguntó con voz más enérgica, «¿Qué forma de responder es esa? Repetiré mi

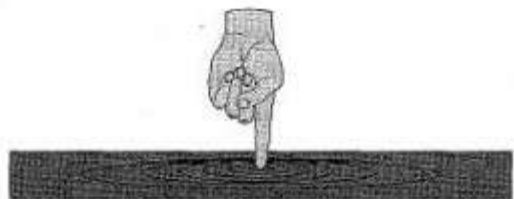
pregunta: ¿la luz está hecha de ondas o está hecha de partículas?», «Eso es correcto», dijo el Sombrero Loco²⁴.

Bienvenido a la casa de las diversiones: el loco, confuso, descabellado mundo de la mecánica cuántica, donde gobierna la incertidumbre y nada tiene sentido para lo razonable.

Respondiendo a Alicia... en cierto modo

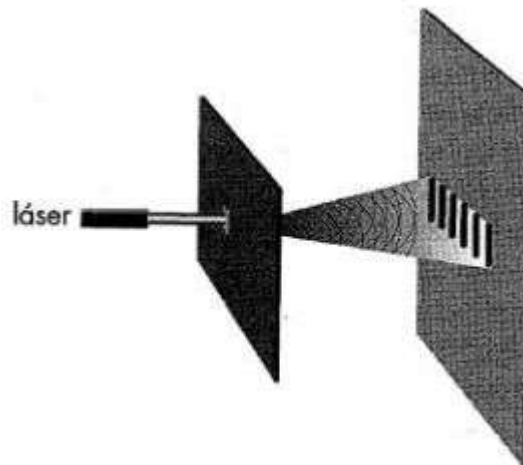
Newton creía que un rayo de luz era una corriente de minúsculas partículas, más o menos como balines disparados por una ametralladora. Aunque la teoría era errónea casi por completo, él ideó explicaciones extraordinariamente ingeniosas para muchas de las propiedades de la luz. Hacia 1865, el matemático y físico escocés James Clerk Maxwell había desacreditado totalmente la teoría de las balas de Newton. Maxwell afirmaba que la luz consiste en ondas: ondas electromagnéticas. Las construcciones de Maxwell fueron abrumadoramente confirmadas y pronto se convirtió en la teoría aceptada.

Maxwell señaló que cuando se mueve la carga eléctrica —por ejemplo, cuando vibran los electrones en un cable— la carga en movimiento crea perturbaciones ondulatorias, de forma muy parecida a las ondas que se crean en un estanque cuando se agita un dedo en la superficie del agua.

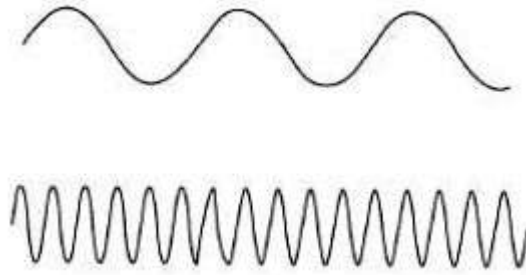


²⁴ Lewis Carroll, *Alice's Adventures in Wonderland*, ilustraciones de John Tenniel (Macmillan and Company, Londres, 1865).

Las ondas luminosas están compuestas de campos eléctricos y magnéticos, los mismos campos que rodean a las partículas cargadas eléctricamente, a las corrientes eléctricas en los cables y a los imanes ordinarios. Cuando vibran dichas cargas y corrientes, emiten ondas que se dispersan a través del espacio vacío a la velocidad de la luz. De hecho, si usted proyecta un rayo de luz a través de dos minúsculas rendijas, puede ver una figura de *interferencia* característica formada por las ondas que se superponen.



La teoría de Maxwell explicaba incluso cómo la luz podía darse en diferentes colores. Las ondas se caracterizan por su longitud de onda, la distancia entre dos crestas sucesivas. He aquí dos ondas, la primera de una longitud de onda mayor que la segunda.



Imagine que las dos ondas se mueven en sus mismas narices a la velocidad de la luz. Mientras pasan, las ondas oscilan de máximo a mínimo y vuelta: cuanto más corta es la longitud de onda, más rápida es la oscilación. El número de ciclos completos (de máximo a mínimo y vuelta a máximo) por segundo se llama *frecuencia*, y obviamente es mayor para la longitud de onda más corta.

Cuando la luz entra en el ojo, las diferentes frecuencias afectan a los conos y bastones de la retina de formas diferentes. Se transmite una señal al cerebro que dice rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul o violeta, dependiendo de la frecuencia (o la longitud de onda). El extremo rojo del espectro consiste en las longitudes de onda más largas (frecuencias más bajas) que el extremo azul y violeta: la longitud de onda de la luz roja es de unos 700 nanómetros²⁵, mientras que la longitud de onda de la luz violeta es sólo la mitad de eso. Puesto que la luz se mueve muy rápida, la frecuencia de la oscilación es enorme. La luz azul oscila mil billones (10^{15}) de veces por segundo; la luz roja oscila aproximadamente la mitad de rápida. En la jerga de la física, la frecuencia de la luz azul es 10^{15} Hz.

²⁵ Un nanómetro es una milmillonésima de metro, o 10^{-9} metros.

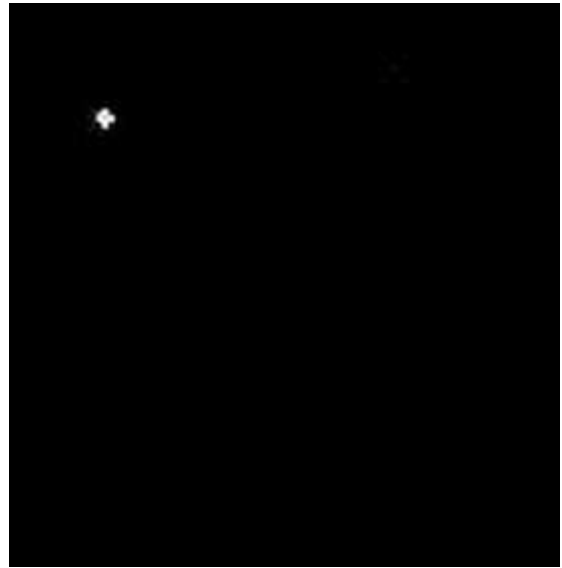
¿Puede la longitud de onda de la luz ser mayor que 700 o menor que 400 nanómetros? Sí, pero entonces no se llama luz; el ojo es insensible a dichas longitudes de onda. Los rayos ultravioleta y los rayos X tienen longitudes de onda más cortas que las ondas violetas, y los rayos con las longitudes más pequeñas se llaman rayos gamma. En el lado de las longitudes de onda más largas, tenemos los rayos infrarrojos, las microondas y las radioondas. El espectro entero, de los rayos gamma a las ondas de radio, se conoce como *radiación electromagnética*.

Por lo tanto, Alicia, la respuesta a tu pregunta es que la luz está definitivamente compuesta de ondas.

Pero espere, no tan rápido. Entre 1900 y 1905, una sorpresa muy perturbadora trastornó los fundamentos de la física y dejó el tema en un estado de completa confusión durante más de veinte años. (Algunos dirían que todavía existe la confusión). Construyendo sobre la obra de Max Planck, Einstein «subvirtió el paradigma dominante». No tenemos tiempo ni espacio para contar la historia de cómo lo hizo, pero en 1905 Einstein estaba convencido de que la luz estaba compuesta de partículas que él llamó *cuantos*. Más tarde se conocerían como *fotones*. Para abreviar una historia fascinante en sus términos más escuetos, cuando la luz es muy tenue se comporta como partículas, que llegan de una en una como si fueran balas intermitentes. Volvamos al experimento en el que la luz atraviesa dos rendijas y finalmente llega a una pantalla. Imaginemos que se atenúa la fuente luminosa hasta que produce un simple hilillo de luz. Un teórico de ondas esperaría una figura

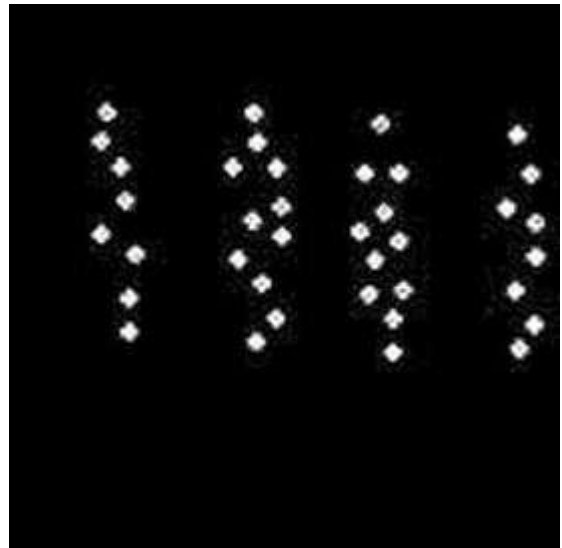
ondulatoria muy tenue, apenas visible, o quizá absolutamente invisible. Pero visible o no, la figura esperada sería ondulatoria.

Eso no es lo que predijo Einstein, y como es habitual tenía razón. En lugar de iluminación continua, su teoría predecía súbitos destellos de luz. El primer destello aparecería al azar en un punto impredecible de la pantalla.



Otro destello aparecería aleatoriamente en algún otro lugar, y luego en otro. Si se fotografiaran los destellos y se superpusieran, empezaría a emerger una figura a partir de los destellos aleatorios: una figura ondulatoria.

Entonces, ¿la luz es una partícula, o es una onda? La respuesta depende del experimento y de la pregunta que se plantee. Si el experimento implica luz tan tenue que los fotones salen de uno en uno, la luz parece ser impredecible y los fotones llegan aleatoriamente. Pero si hay fotones suficientes de modo que forman una figura, la luz se comporta como las



ondas. El gran físico Niels Bohr describió esta situación confusa diciendo que las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz son *complementarias*.

Einstein argumentaba que los fotones deben tener energía. Ciertamente había pruebas de ello. La luz solar —los fotones emitidos por el Sol— calienta la Tierra. Los paneles solares convierten los fotones del Sol en electricidad. La electricidad puede utilizarse para mover un motor y elevar una carga pesada. Si la luz tiene energía, también deben tenerla los fotones que la forman.

Es evidente que un solo fotón tiene sólo una cantidad de energía muy pequeña, pero ¿cuánta exactamente? ¿Cuántos fotones se necesitan para hacer hervir una taza de té o mover un motor de 100 vatios durante una hora? La respuesta depende de la longitud de onda de la radiación. Los fotones de longitud de onda más larga son menos energéticos que los de longitud de onda más corta. Por ello se necesitan más fotones de longitud de onda más larga para hacer un trabajo dado. Una fórmula muy famosa —no tan famosa como $E=mc^2$, pero también muy famosa— da la energía de un solo fotón en términos de su frecuencia²⁶:

$$E = hf$$

El primer miembro de la ecuación, E , representa la energía del fotón, medida en una unidad llamada julio. En el segundo miembro,

²⁶ Esta fórmula fue introducida por Max Planck en 1900. Sin embargo, fue Einstein quien comprendió que la luz está hecha de cuantos de tipo partícula y que la fórmula se aplica a la energía de un simple fotón.

f es la frecuencia. Para la luz azul, la frecuencia es 10^{15} Hz. Nos queda por definir h , la famosa constante de Planck que Max Planck introdujo en 1900. La constante de Planck es un número muy pequeño, pero es una de las constantes más importantes de la Naturaleza, que controla todos los fenómenos cuánticos. Figura junto a la velocidad de la luz, c , y la constante gravitatoria de Newton, G .

$$h = 6,62 \times 10^{-34}.$$

Puesto que la constante de Planck es muy pequeña, la energía de un simple fotón es minúscula. Para calcular la energía de un fotón azul, multiplicamos la constante de Planck por la frecuencia, 10^{15} Hz, y obtenemos $6,62 \times 10^{-19}$ julios. Eso no parece mucha energía, y no lo es. Se necesitarían unos 10^{39} fotones de luz azul para hervir el té. Usted necesitaría aproximadamente un número doble de fotones de luz roja. Por el contrario, con los rayos gamma de la energía más alta que se han detectado, hervir la misma taza de té necesitaría sólo 10^{18} fotones.

De todas estas fórmulas y números, quiero recordarle sólo una cosa: cuanto más corta es la longitud de onda de un rayo luminoso, mayor es la energía de un fotón individual. Energía alta significa longitud de onda corta; baja energía significa longitud de onda larga. Dígalo en voz alta unas veces y escríbalo. Ahora dígalo de nuevo: alta energía significa longitud de onda corta; baja energía significa longitud de onda larga.

¿Predecir el futuro?

Einstein declaró pomposamente, «Dios no juega a los dados²⁷». La respuesta de Niels Bohr fue tajante: «Einstein», remachó Bohr, «*no le digas a Dios lo que tiene que hacer*». Ambos estaban muy cerca de ser ateos; parecería poco probable que cualquiera de ellos contemplara una deidad sentada en una nube tratando de sacar un siete. Pero tanto Bohr como Einstein estaban luchando con algo totalmente nuevo en física, algo que Einstein sencillamente no podía aceptar: la impredecibilidad que implicaban las nuevas y extrañas reglas de la mecánica cuántica. El intelecto de Einstein se rebelaba contra la idea de un elemento aleatorio e incontrolable en las leyes de la Naturaleza. La idea de que la llegada de un fotón era realmente un suceso impredecible iba profundamente en contra de sus principios. A Bohr, por el contrario, podría gustarle o no la idea, pero la aceptaba. También entendía que los físicos del futuro tendrían que recablearse para la mecánica cuántica, y parte de dicho recableado incluiría la impredecibilidad que temía Einstein.

No es que Bohr fuese mejor en visualizar los fenómenos cuánticos o que se sintiese más cómodo con ellos. «Cualquiera que no esté conmocionado por la teoría cuántica no la ha entendido», declaró en cierta ocasión. Muchos años más tarde, Richard Feynman opinaba, «Creo que se puede decir con certeza que nadie entiende la mecánica cuántica». Y añadía, «Cuanto más ve uno cuán extraño es el comportamiento de la Naturaleza, más difícil es hacer un modelo

²⁷ Carta a Max Born, 12 de diciembre de 1926.

que explique cómo funciona realmente incluso el fenómeno más simple. Por eso los físicos teóricos han dejado de hacerlo». No creo que Feynman quisiera decir realmente que los físicos deberían dejar de explicar los fenómenos cuánticos; después de todo, él los estaba explicando constantemente. Lo que quería decir era que no se pueden explicar los fenómenos cuánticos en términos que la mente humana pueda visualizar con su cableado de serie. Feynman, no menos que cualquier otro, tenía que recurrir a las matemáticas abstractas. Obviamente, leer un capítulo en un libro que no tenga ecuaciones no puede recablearle, pero creo que con un poco de paciencia usted puede captar los puntos importantes.

Lo primero de lo que los físicos tuvieron que liberarse —algo muy querido para Einstein— era la idea de que las leyes de la Naturaleza son deterministas. Determinismo significa que el futuro puede predecirse si se conoce suficiente sobre el presente. La mecánica newtoniana, como todo lo que le siguió, trataba de predecir el futuro. Pierre-Simon de Laplace —el mismo Laplace que imaginó estrellas oscuras— creía firmemente que podía predecirse el futuro. He aquí lo que escribió:

Podemos considerar el estado presente del universo como efecto de su pasado y causa de su futuro. Un intelecto que en cierto instante conociera todas las fuerzas que ponen en movimiento la Naturaleza y todas las posiciones de todos los objetos de los que está compuesta la Naturaleza, y si este intelecto fuera también lo suficientemente vasto para someter estos datos al análisis, englobaría en una única fórmula los movimientos de los cuerpos

más grandes del universo y los del átomo más minúsculo; para tal intelecto nada sería incierto y el futuro igual que el pasado estaría presente ante sus ojos.

Laplace estaba desarrollando simplemente las implicaciones de las leyes de movimiento de Newton. De hecho, la visión de la Naturaleza de Newton-Laplace es la forma más pura de *determinismo*. Para predecir el futuro, todo lo que había que saber era la posición y la velocidad de cada partícula en el universo en un instante inicial de tiempo. ¡Ah, sí!, y una cosa más: habría que conocer las fuerzas que actúan sobre cada partícula. Note que no basta con conocer la posición en un instante. Conocer la localización de una partícula no dice nada sobre dónde va. Pero si conocemos también la velocidad²⁸ —tanto su magnitud como su dirección— podemos decir dónde estará a continuación. Los físicos hablan de *condiciones iniciales*, por lo que se entiende todo lo que se necesita saber en un instante para predecir el movimiento futuro de un sistema.

Para entender lo que significa determinismo, imaginemos el mundo más simple posible: un mundo tan simple que sólo tiene dos estados. Una moneda es un buen modelo, siendo cara y cruz los dos estados. También necesitamos especificar una ley que dice cómo cambian las cosas de un instante al siguiente. He aquí dos posibilidades para una ley semejante.

²⁸ El término *velocidad* significa no sólo con qué rapidez se está moviendo un objeto sino también en qué dirección se mueve. Así, 100 kilómetros por hora no da una información completa sobre la velocidad; sí lo es 100 kilómetros por hora en dirección noroeste.

- Este primer ejemplo es muy tedioso. La regla es: nada sucede. Si la moneda muestra cara en un instante, muestra cara en el instante siguiente (digamos, un nanosegundo más tarde). Análogamente, si muestra cruz en un instante, muestra cruz en el instante siguiente. La ley puede condensarse en un simple par de «fórmulas»:

$$C \rightarrow C \quad Z \rightarrow Z$$

La historia del mundo es o bien C C C C C... o bien Z Z Z Z Z... repetido interminablemente.

- Si la primera regla es aburrida, la siguiente sólo lo es un poco menos: cualquiera que sea el estado en un instante, un nanosegundo más tarde cambia al estado contrario. Simbólicamente, puede expresarse de esta manera:

$$C \rightarrow Z \quad Z \rightarrow C$$

La historia tomaría la forma C Z C Z C Z C Z... o Z C Z C Z C Z C...

Ambas reglas son deterministas, lo que significa que el futuro está completamente determinado por el punto de partida. En uno u otro caso, si se conoce la condición inicial se puede predecir con certeza lo que sucederá al cabo de cualquier lapso de tiempo.

Las leyes deterministas no son la única posibilidad. También son posibles leyes aleatorias. La ley aleatoria más simple sería que cualquiera que sea el estado inicial, el estado siguiente es cara o cruz aleatoriamente. Una historia posible, que empieza con cruz, sería Z Z Z C C C Z Z C C Z C C Z Z... Pero también sería posible Z

Z C Z C C Z C C C Z Z... De hecho, cualquier secuencia sería posible. Se puede pensar en un mundo sin una ley o un mundo en el que la ley es una actualización aleatoria de la condición inicial.

La ley no tendría que ser puramente determinista o puramente aleatoria. Éstos son casos extremos. Es posible una ley mayoritariamente determinista, con sólo un toque de aleatoriedad. La ley podría decir que el estado permanece invariable con probabilidad nueve décimas, y cambia con probabilidad una décima. Una historia típica tendría este aspecto:

CCCCCCCZZZZZZZZZZZZZZCCCCCCCCCCCCZZZZZ...

En este caso, un jugador podría hacer una conjetura muy buena sobre el futuro inmediato: el estado siguiente será muy probablemente el mismo que el estado presente. Podría incluso ser un poco más atrevido y conjeturar que los siguientes dos estados serán el mismo que el presente. Sus probabilidades de estar en lo cierto serían buenas, siempre que no las llevase demasiado lejos. Si tratara de conjeturar un futuro demasiado lejano, sus probabilidades de estar en lo cierto no serían mucho mejores que de no estarlo. Esta impredecibilidad es exactamente lo que Einstein estaba planteando cuando dijo que Dios no juega a los dados.

Quizá le intrigue una cuestión: una secuencia de lanzamientos de moneda reales se parece mucho más a la ley totalmente aleatoria que a cualquiera de las leyes deterministas. La aleatoriedad parece una característica muy común del mundo natural. ¿Quién necesita

la mecánica cuántica para hacer el mundo impredecible? Pero la razón de que un lanzamiento de moneda normal sea impredecible — incluso en ausencia de mecánica cuántica— es simplemente el desconocimiento. Controlar todos los detalles relevantes es normalmente demasiado difícil. Una moneda no es realmente un mundo aislado. Los detalles de los músculos que mueven la mano que lanza la moneda; las corrientes de aire en la habitación; las vibraciones térmicas de las moléculas de la moneda y del aire... todas estas cosas son relevantes para el resultado, y en la mayoría de los casos toda esta información es demasiado grande para poderla manejar. Recuerde que Laplace hablaba de conocer «*todas* las fuerzas que ponen en movimiento la Naturaleza, y *todas* las posiciones de todos los objetos de los que está compuesta la Naturaleza». El más mínimo error en la posición de una simple molécula podría arruinar la capacidad de predecir el futuro. Pero no es este tipo ordinario de aleatoriedad lo que molestaba a Einstein. Por Dios jugando a los dados, Einstein quería decir que las leyes más profundas de la Naturaleza tienen un elemento de aleatoriedad inevitable que nunca puede superarse, incluso si se conocen todos los detalles que puedan conocerse.

La información nunca muere

Una razón convincente para no admitir la aleatoriedad es que en muchos casos violaría la *conservación de la energía* (véase capítulo 7). Esta ley afirma que aunque la energía se da en muchas formas y puede cambiar de una forma a otra, la cantidad total de energía

nunca cambia. La conservación de la energía es uno de los hechos de la Naturaleza mejor confirmados, y no hay mucho lugar para jugar con ello. Unos golpes aleatorios cambiarían la energía de un objeto acelerándolo o frenándolo repentinamente.

Hay otra ley de la física muy sutil que quizá sea incluso más fundamental que la conservación de la energía. A veces se le llama reversibilidad, pero vamos a llamarla simplemente *conservación de la información*. La conservación de la información implica que si se conoce el presente con precisión perfecta, se puede predecir el futuro para cualquier instante. Pero eso es sólo la mitad de la cosa. También dice que si se conoce el presente, se puede estar absolutamente seguro del pasado. Va en ambas direcciones.

En el mundo caras-cruces de una única moneda, una ley puramente determinista aseguraría que la información se conserva perfectamente. Por ejemplo, si la ley es:

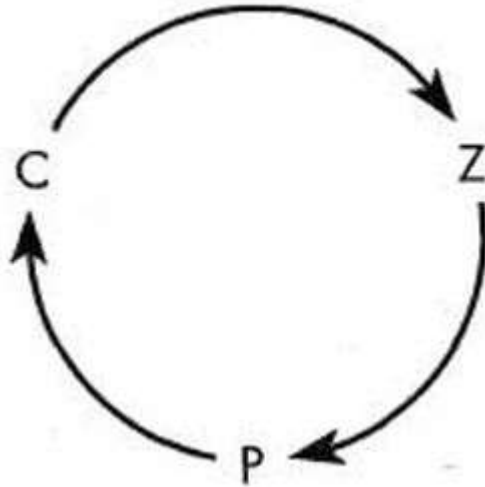
$$C \rightarrow Z \quad Z \rightarrow C$$

tanto el pasado como el futuro pueden predecirse perfectamente. Pero incluso la más mínima cantidad de aleatoriedad arruinaría esta perfecta predecibilidad.

Déjeme dar otro ejemplo, esta vez con una moneda ficticia de tres caras (un dado es una moneda de seis caras). Llamemos a los tres lados caras, cruces y pies o C, Z y P. He aquí una ley perfectamente determinista.

$$C \rightarrow Z \quad Z \rightarrow P \quad P \rightarrow C$$

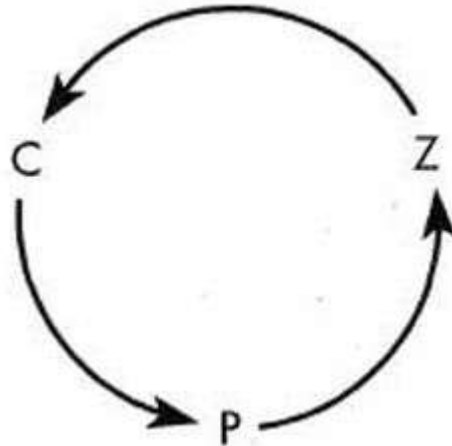
Para visualizar la ley, es útil dibujar un diagrama.



Con esta ley, la historia del mundo, empezando con C, se parecería a esto:

CZPCZPCZPCZPCZPCZPCZP...

¿Hay una manera de poner a prueba experimentalmente la conservación de la información? De hecho, hay muchas maneras, unas factibles y otras no. Si usted fuera capaz de controlar la ley y cambiarla a voluntad, habría una manera muy simple de ponerla a prueba. En el caso de la moneda de tres caras, he aquí cómo podría funcionar. Empecemos con la moneda en uno de sus tres estados y dejémosla correr durante algún intervalo definido de tiempo. Supongamos que cada nanosegundo el estado cambia de C a Z y a P, recorriendo cíclicamente las tres posibilidades. Al final del intervalo de tiempo, cambiamos la ley. La nueva ley es simplemente la anterior invertida, en sentido antihorario en lugar de horario.

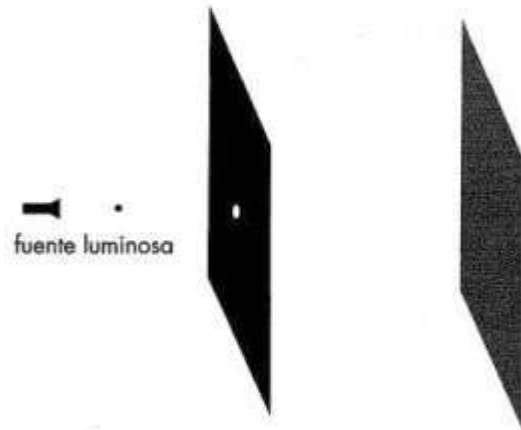


Corramos ahora el sistema al revés durante exactamente la misma longitud de tiempo que lo hicimos correr hacia delante. La historia original se deshacerá, y la moneda volverá al punto de partida. Por mucho tiempo que espere, la ley determinista retendrá una memoria perfecta y siempre volverá a las condiciones iniciales. Para comprobar la conservación de la información, ni siquiera necesitaría conocer la ley exacta, siempre que usted sepa cómo invertirla. El experimento siempre funcionará con tal de que la ley sea determinista. Pero fallará si hay aleatoriedad, a menos que la aleatoriedad sea de un tipo muy sutil.

Volvamos ahora a Einstein, Bohr, Dios (lea: las leyes de la física) y la mecánica cuántica. Otra de las citas muy famosas de Einstein es «El Señor es sutil, pero no malicioso». Yo no sé qué le hacía pensar que las leyes de la física no son maliciosas. Yo, personalmente, encuentro a veces la ley de la gravedad muy maliciosa, especialmente a medida que me hago viejo. Pero Einstein tenía razón sobre la sutileza. Las leyes de la mecánica cuántica son muy

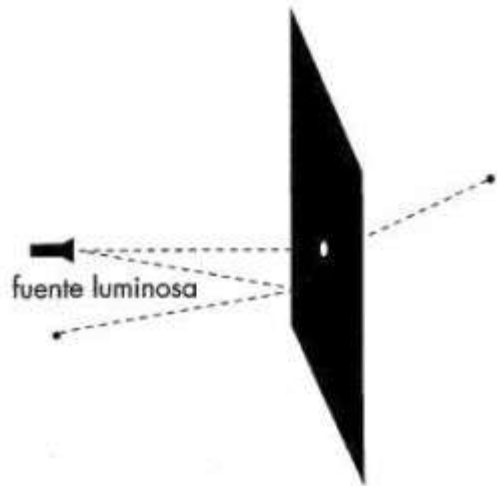
sutiles; tan sutiles que permiten que la aleatoriedad coexista con la conservación de la energía y la conservación de la información.

Consideremos una partícula: cualquier partícula servirá, pero un fotón es una buena elección. El fotón es producido por una fuente luminosa —un láser, por ejemplo— y se dirige hacia una lámina opaca



de metal con un minúsculo agujero. Detrás del agujero hay una pantalla fosforescente que produce destellos cuando un fotón incide en ella.

Al cabo de un tiempo, el fotón puede atravesar el pequeño agujero o puede errar y rebotar en el obstáculo. Si atraviesa el agujero, incidirá en la pantalla, pero no necesariamente en el punto que hay directamente detrás del agujero. En lugar de seguir una línea recta, el fotón puede recibir un impulso aleatorio cuando atraviesa el agujero. Por ello, la posición final del destello es impredecible.



Eliminemos ahora la pantalla fosforescente y volvamos a hacer el experimento. Al cabo de un breve tiempo, el fotón o bien incidirá en la lámina metálica y rebotará, o bien

atravesará el agujero y recibirá un impulso aleatorio. Sin nada para

detectar el fotón, es imposible decir dónde está el fotón y en qué dirección se está moviendo.

Pero imaginemos que intervenimos e invertimos la ley del movimiento del fotón²⁹. ¿Qué cabría esperar si hiciésemos que el fotón fuera al revés durante el mismo intervalo de tiempo? La expectativa obvia es que la aleatoriedad (la aleatoriedad al revés sigue siendo aleatoriedad) destruirá cualquier esperanza de que el fotón vuelva a su posición original. La aleatoriedad de la segunda mitad del experimento debería sumarse a la aleatoriedad de la primera mitad y hacer todavía más impredecible el movimiento del fotón.

Pero la respuesta es mucho más sutil. Antes de explicarla, volvamos brevemente al experimento con la moneda de tres caras. En ese caso, también corríamos una ley en una dirección y luego la invertíamos. Había un detalle del experimento que dejé fuera: no dije si alguien miraba o no la moneda inmediatamente antes de que invirtiésemos la ley. ¿Qué diferencia supondría que alguien lo hiciera? No supondría ninguna diferencia, mientras mirar la moneda no la haga saltar a un nuevo estado. Eso no parece una condición muy restrictiva; aún tengo que ver lanzar una moneda al aire y que cambie sólo porque alguien la mire. Pero en el delicado mundo de la mecánica cuántica no es posible mirar algo sin perturbarlo.

²⁹ Si usted es un experto podrá preguntarse si es realmente posible intervenir e invertir una ley. En la práctica, normalmente no es posible, pero para algunos sistemas simples, no es difícil. En cualquier caso, como experimento mental o ejercicio matemático, es totalmente factible.

Consideremos el fotón: cuando hacemos marchar el fotón a la inversa ¿reaparece en su localización original, o la aleatoriedad de la mecánica cuántica destruye la conservación de la información? La respuesta es extraña: todo depende de si miramos o no el fotón cuando intervenimos. Por «mirar el fotón» quiero decir comprobar dónde está localizado o en qué dirección se está moviendo. Si miramos, el resultado final (después de hacerlo marchar hacia atrás) será aleatorio, y fallará la conservación de la información. Pero si ignoramos la localización del fotón —si no hacemos absolutamente nada para determinar su posición o su dirección de movimiento— y tan sólo invertimos la ley, el fotón reaparecerá mágicamente en la localización original después del período de tiempo prescrito. En otras palabras, a pesar de su impredecibilidad, la mecánica cuántica respeta la conservación de la información. Ya sea el Señor malicioso o no, ciertamente es sutil.

Correr las leyes de la física hacia atrás es perfectamente factible, matemáticamente hablando. Pero ¿podemos hacerlo realmente? Dudo mucho que alguien sea alguna vez capaz de invertir siquiera los sistemas más simples. Sin embargo, ya podemos llevarlo a la práctica o no, la reversibilidad matemática de la mecánica cuántica (los físicos la llaman *unitariedad*) es crítica para su consistencia. Sin ella, la lógica cuántica no se sostendría.

Entonces, ¿por qué Hawking pensaba que la información se destruía cuando se combinaba la teoría cuántica con la gravedad? Reduciendo los argumentos a un eslogan:

La información que cae en un agujero negro es información perdida.

Por decirlo de otra forma, la ley nunca puede invertirse porque nada puede regresar desde detrás del horizonte de un agujero negro.

Si Hawking hubiera tenido razón, las leyes de la Naturaleza habrían tenido un elemento de aleatoriedad aumentado, y el fundamento de la física habría colapsado. Pero volveremos a eso más tarde.

El principio de incertidumbre

Laplace creía que podría predecir el futuro si conociese suficiente sobre el presente. Por desgracia para todos los adivinos del mundo, no es posible saber la posición y la velocidad de un objeto al mismo tiempo. Cuando digo que no es posible, no quiero decir que sea muy difícil o que la tecnología actual no esté a punto. Ninguna tecnología que obedezca las leyes de la física podría estar nunca a punto, de la misma forma que ninguna tecnología mejorada puede permitir ir a más velocidad que la luz. Cualquier experimento diseñado para medir simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula chocará con el principio de incertidumbre de Heisenberg.

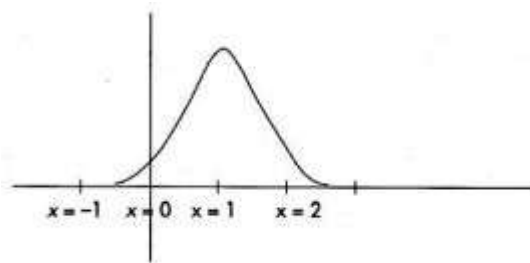
El principio de incertidumbre fue la gran divisoria que estableció una separación en la física entre la era *clásica* precuántica y la era posmoderna de la «extrañeza» cuántica. La física clásica consiste en todo lo que vino antes de la mecánica cuántica, incluida la teoría del movimiento de Newton, la teoría de la luz de Maxwell y las teorías de

la relatividad de Einstein. La física clásica es determinista; la física cuántica está llena de incertidumbre.

El principio de incertidumbre es una afirmación extraña y audaz que hizo en 1927 Werner Heisenberg, entonces un joven de 26 años, inmediatamente después de que él y Edwin Schrödinger descubrieran las matemáticas de la mecánica cuántica. Incluso en una época de ideas muy poco familiares, el principio sonaba especialmente extraño. Heisenberg no afirmaba que hubiera una limitación a la precisión con que se podía medir la posición de un objeto. Las coordenadas que localizan a una partícula en el espacio pueden determinarse con el grado de precisión que se quiera. Tampoco ponía ninguna limitación a la precisión con que podía medirse la velocidad de un objeto. Lo que él afirmaba era que nunca podría diseñarse un experimento, por complejo o ingenioso que fuera, para medir la posición y la velocidad simultáneamente. Es como si el Dios de Einstein hubiese asegurado que nadie podría saber nunca lo suficiente para predecir el futuro.

El principio de incertidumbre trata de la borrosidad, pero paradójicamente no hay nada borroso en él. La incertidumbre es un concepto preciso que implica medidas de probabilidad, cálculo integral y otras matemáticas sofisticadas. Pero parafraseando una frase bien conocida, una imagen vale por mil ecuaciones. Empecemos con la idea de una distribución de probabilidad. Supongamos que se estudia un gran número de partículas — digamos un billón— midiendo sus posiciones a lo largo del eje horizontal, también llamado eje X. La primera partícula se

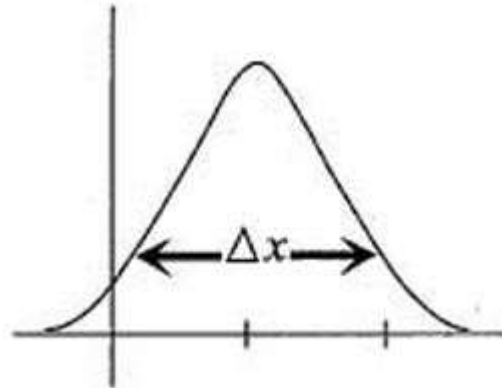
encuentra en $x = 1,3257$, la segunda en $x = 0,9134$, y así sucesivamente. Podríamos hacer una larga lista con las posiciones de todas las partículas. Por desgracia la lista llenaría unos diez millones de libros tan grandes como éste, y dicha lista no nos resultaría terriblemente interesante para la mayoría de los fines. Sería mucho más esclarecedor tener una gráfica estadística que mostrara la fracción de partículas que se encuentran en cada valor de x . Dicha gráfica podría tener un aspecto como éste:



Una ojeada a la gráfica nos dice que la mayoría de las partículas se encontraban cerca de $x = 1$. Eso podría bastar para algunos fines. Pero con sólo examinar la gráfica podemos ser mucho más precisos. Alrededor de un 90 % de las partículas estaban entre $x = 0$ y $x = 2$. Si tuviéramos que apostar dónde se encontraba una partícula concreta, la mejor conjetura sería en $x = 1$, pero la incertidumbre — una medida matemática de la anchura de la curva— sería de unas 2 unidades³⁰. La letra griega delta (Δ) es un símbolo matemático estándar para la incertidumbre. En este ejemplo representaría la incertidumbre en la coordenada x de las partículas.

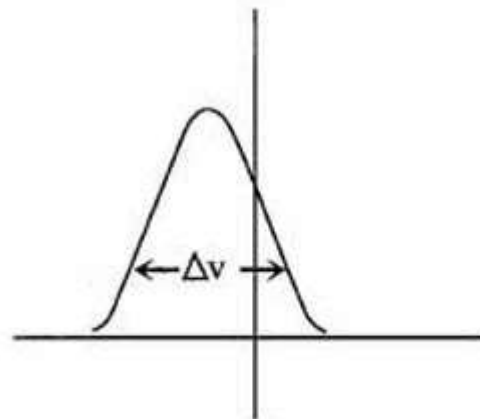
³⁰ Por supuesto, la curva en forma de campana se extiende más allá de las puntas de las flechas en la gráfica, de modo que hay alguna posibilidad de encontrar partículas en las regiones más lejanas. La incertidumbre matemática nos da el intervalo de valores *probables*.

Hagamos otro experimento mental. En lugar de medir las posiciones de las partículas, medimos sus velocidades, contándolas positivas si una partícula se mueve hacia la derecha y negativas si se mueve hacia la izquierda. Esta vez, el eje horizontal representa la velocidad, v . En la gráfica se puede ver que la mayoría de las partículas se mueven hacia la izquierda, y también es posible hacerse una idea de la incertidumbre en la velocidad, Δv .



Lo que en líneas generales dice el principio de incertidumbre es esto: cualquier intento por reducir la incertidumbre de la posición ampliará inevitablemente la incertidumbre de la velocidad. Por ejemplo, podríamos seleccionar intencionadamente sólo las partículas que se encuentran en un estrecho rango de x —digamos, entre $x = 0,9$ y $x = 1,1$ — prescindiendo de todas las demás. Para este subconjunto de partículas escogido con más precisión, la incertidumbre sería sólo $0,2$, diez veces menor que la Δx original. Cabría esperar que de este modo pudiéramos batir al principio de incertidumbre, pero no funciona.

Resulta que si tomamos el mismo subconjunto de partículas y medimos sus velocidades,



encontramos que su dispersión es mucho mayor que en la muestra

original. Quizá usted se pregunte por qué es así, pero me temo que es simplemente uno de esos hechos cuánticos incomprensibles que no tienen explicación clásica; una de esas cosas de las que Feynman decía, «Por eso la física teórica ha renunciado [a explicarla]».

Aunque incomprensible, es un hecho experimental que, hagamos lo que hagamos para reducir Δx , el resultado inevitable es un aumento en Δv . Análogamente, todo lo que reduce Δv , da como resultado un aumento en Δx . Cuanto más tratamos de precisar la localización de una partícula, más incierta hacemos su velocidad, y viceversa.

Ésa es la idea general, pero Heisenberg fue capaz de cuantificar de forma más precisa su principio de incertidumbre. El principio de incertidumbre afirma que el producto y la masa de la partícula es siempre mayor que ($>$) la constante de Planck, h .

$$m\Delta v \Delta x > h.$$

Veamos cómo funciona. Supongamos que tenemos mucho cuidado en preparar las partículas de modo que Δx sea extraordinariamente pequeña. Eso obliga a Δv a ser suficientemente grande para que el producto sea mayor que h . Cuanto menor hagamos Δx , mayor tiene que ser Δv .

¿Por qué no advertimos el principio de incertidumbre en la vida cotidiana? ¿Ha experimentado alguna vez, mientras conduce, una borrosidad aumentada en su posición cuando mira cuidadosamente el velocímetro? ¿Ha visto que el velocímetro se volvía loco cuando

usted estaba examinando el mapa para ver dónde se encontraba? Por supuesto que no. Pero ¿por qué no? Después de todo, el principio de incertidumbre no tiene preferencias: se aplica a todas las cosas, incluidos usted y su automóvil, tanto como a los electrones. La clave para la respuesta está en la masa que aparece en la fórmula y en la pequeñez de la constante de Planck. En el caso de un electrón, la masa muy pequeña tiende a compensar la pequeñez de h , y por lo tanto las incertidumbres combinadas Δv y Δx deben ser bastante grandes. Pero la masa de un automóvil es enorme comparada con la constante de Planck. Por esa razón, Δv y Δx pueden ser pequeñísimas sin violar el principio de incertidumbre. Ahora puede usted apreciar por qué la Naturaleza no preparó nuestros cerebros para la incertidumbre cuántica. No había necesidad; en la vida ordinaria, nunca encontramos objetos suficientemente livianos para que importe el principio de incertidumbre.

Eso es entonces el principio de incertidumbre de Heisenberg: una Trampa-22 definitiva que garantiza que nadie puede saber nunca lo suficiente para predecir el futuro. Volveremos al principio de incertidumbre en el capítulo 15.

El movimiento de punto cero y las agitaciones cuánticas

Un pequeño recipiente, quizá de un centímetro, se llena con átomos —átomos de helio que son prácticamente inertes— y luego se calienta a alta temperatura. Gracias al calor, las partículas se mueven a gran velocidad, chocando continuamente unas con otras

y rebotando de un lado a otro del recipiente. El constante bombardeo da lugar a la presión en las paredes.

Para los niveles ordinarios, los átomos se mueven muy rápidos: su velocidad media es de unos 1500 metros por segundo. A continuación se enfría el gas. Al eliminar el calor, se drena energía, y los átomos se frenan. Con el tiempo, si seguimos eliminando calor, el gas se enfriará hasta la mínima temperatura posible: el cero absoluto, o aproximadamente -273 grados en la escala centígrada. Al perder toda su energía, los átomos llegan al reposo y desaparece la presión sobre las paredes del recipiente.

Eso es al menos lo que *se suponía* que sucede. Pero este razonamiento no tiene en cuenta el principio de incertidumbre.

Consideremos esto: ¿qué sabemos sobre la posición de un átomo en este caso? En realidad, mucho: todos los átomos están confinados en el interior del recipiente, y el tamaño del recipiente es de sólo un centímetro. Obviamente, la incertidumbre en la posición es menor que un centímetro. Supongamos por un momento que todos los átomos llegan realmente al reposo cuando se ha drenado todo el calor. Todos los átomos tendrían velocidad cero sin ninguna incertidumbre. En otras palabras, Δv sería cero. Pero eso no es posible. Si fuera cierto, significaría que el producto $m\Delta x\Delta v$ también sería cero, y cero es decididamente menor que la constante de Planck. En otras palabras, si la velocidad de cada átomo fuese cero, la incertidumbre en su posición sería infinita. Pero no lo es. Los átomos están en el recipiente. Por lo tanto, incluso en el cero absoluto, los átomos no pueden pararse por completo; seguirán

rebotando en las paredes del recipiente y ejerciendo presión. Esta es una de las rarezas inesperadas de la mecánica cuántica.

Cuando se ha extraído toda la energía posible de un sistema (cuando la temperatura es el cero absoluto), los físicos dicen que se encuentra en su *estado fundamental*. El movimiento fluctuante residual en el estado fundamental se denomina habitualmente *movimiento de punto cero*, pero el físico Brian Greene ha acuñado un nombre coloquial más descriptivo. Le llama «agitaciones cuánticas».

Las posiciones de las partículas no son lo único que se agita. Según la Mecánica Cuántica, todo lo que se puede agitar, se agita. Otro ejemplo son los campos eléctrico y magnético en el espacio vacío. Los campos eléctrico y magnético vibrantes están a nuestro alrededor y llenan el espacio en forma de ondas luminosas. Incluso en una habitación oscura, el campo electromagnético vibra en forma de ondas infrarrojas, microondas y ondas de radio. Pero ¿qué pasa si oscurecemos la habitación tanto como permite la ciencia eliminando todos los fotones? Los campos eléctrico y magnético continúan agitándose. El espacio «vacío» es un ambiente agitado, oscilante, violentamente vibrante que nunca puede estar en reposo.

Antes de que nadie supiera nada de la mecánica cuántica, si se sabía de las «agitaciones térmicas» que hacen que todo fluctúe. Por ejemplo, calentar un gas hace que aumente el movimiento aleatorio de las moléculas. Incluso cuando se calienta el espacio vacío, está lleno de campos eléctrico y magnético agitados. Esto no tiene nada que ver con la mecánica cuántica y era conocido en el siglo XIX.

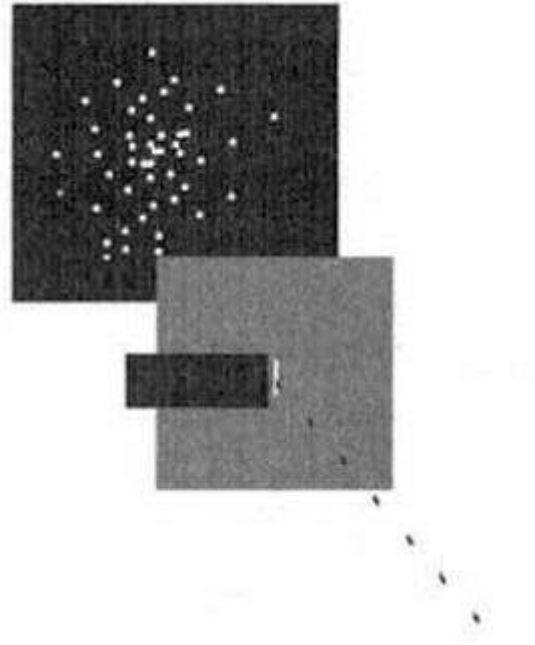
Las agitaciones cuánticas y térmicas se parecen en algunos aspectos pero no en otros. Las agitaciones térmicas son muy notables. Las agitaciones térmicas de las moléculas y los campos eléctrico y magnético mueven las terminaciones nerviosas de nuestro cuerpo y nos hacen sentir calor. Pueden ser muy destructivas. Por ejemplo, la energía de las agitaciones térmicas de los campos electromagnéticos puede transferirse a los electrones en los átomos. Si la temperatura es suficientemente alta, los electrones pueden ser expulsados de los átomos. Esa misma energía puede quemarnos o incluso vaporizarnos. Las agitaciones cuánticas, por el contrario, incluso si pueden ser increíblemente energéticas, no causan dolor. No excitan las terminaciones nerviosas ni destruyen los átomos de nuestro cuerpo. ¿Por qué? Se necesita energía para ionizar un átomo (expulsar sus electrones) o excitar las terminaciones nerviosas. Pero no hay forma de tomar prestada energía del estado fundamental. Las agitaciones cuánticas son lo que queda cuando el sistema tiene la mínima energía absoluta. Aunque increíblemente violentas, las fluctuaciones cuánticas no tienen ninguno de los efectos destructivos de las fluctuaciones térmicas porque su energía «no está disponible».

Magia negra

Para mí, la parte más extravagante de la magia de la mecánica cuántica es la *interferencia*. Volvamos al experimento de la doble rendija que describí al principio de este capítulo. Tiene tres elementos: una fuente luminosa, un obstáculo plano con dos

pequeñas rendijas, y una pantalla fosforescente que emite destellos cuando incide la luz.

Empecemos este experimento bloqueando la rendija izquierda. El resultado es una mancha luminosa uniforme en la pantalla. Si reducimos la intensidad, descubrimos que la mancha es realmente una colección de destellos aleatorios provocados por fotones individuales. Los destellos son impredecibles, pero cuando hay suficientes emerge una pauta parecida a una mancha.



Si abrimos la rendija izquierda y bloqueamos la rendija derecha, la pauta promedio en la pantalla parece casi invariable, salvo que se desplaza muy ligeramente hacia la izquierda.

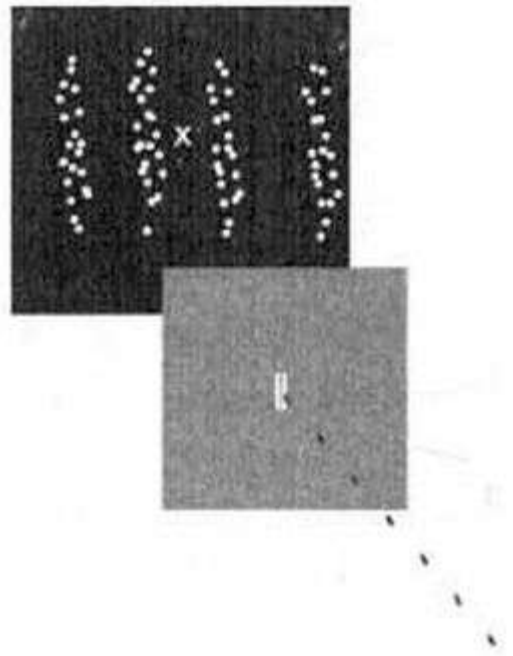
La sorpresa aparece cuando abrimos ambas rendijas. En lugar de sumarse simplemente los fotones de la rendija izquierda a los fotones de la rendija derecha para formar una mancha más intensa pero todavía uniforme, nuestra acción da como resultado una nueva figura a modo de líneas de cebra.

Una cosa muy singular sobre la nueva figura es que hay franjas oscuras donde no llegan fotones, *incluso si esas mismas regiones estaban llenas de destellos cuando sólo estaba abierta una rendija*. Tomemos el punto marcado con una X en la franja oscura central.

Los fotones atraviesan fácilmente una u otra rendija y llegan a X cuando sólo una rendija está abierta en un momento dado. Cabría pensar que cuando ambas rendijas estén abiertas, llegaría a X un número de fotones aún mayor. Pero abrir ambas rendijas tiene el efecto paradójico de cortar el flujo de fotones a X. ¿Por qué abrir ambas rendijas hace menos probable que un fotón llegue al destino X?

Imaginemos un grupo de prisioneros borrachos amontonados en un calabozo con dos puertas al exterior. El carcelero tiene cuidado de no dejar nunca una puerta abierta, porque algunos prisioneros, por borrachos que estén, encontrarán accidentalmente una salida. Pero él no tiene reparos en dejar ambas puertas abiertas. Una magia misteriosa impide escapar a los borrachos cuando ambas puertas están abiertas. Por supuesto, esto no es lo que sucede con prisioneros reales, pero es el tipo de cosas que predice a veces la mecánica cuántica, no sólo para fotones sino para todas las partículas.

El efecto parece extraño cuando se piensa que la luz consta de partículas, pero es un tópico con ondas. Las dos ondas, que emanan de las dos rendijas, se refuerzan mutuamente en algunos puntos y se cancelan en otros. En la teoría ondulatoria de la luz, las



franjas oscuras se deben a la cancelación, conocida de otra forma como *interferencia destructiva*. El único problema es que a veces la luz parece consistir realmente en partículas.

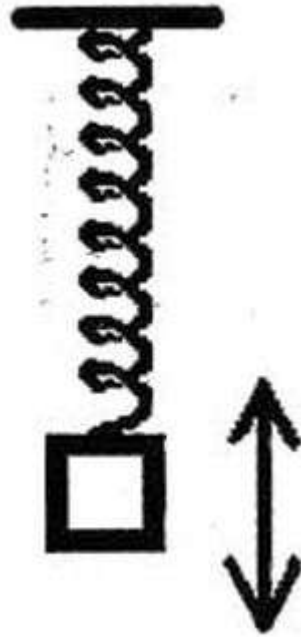
Lo cuántico en la mecánica cuántica

Una onda electromagnética es un ejemplo de una oscilación. Los campos eléctrico y magnético en cada punto del espacio vibran con una frecuencia que depende del color de la radiación. Hay muchas otras oscilaciones en la Naturaleza. He aquí algunos ejemplos comunes.

- Un reloj de péndulo. El péndulo oscila de un lado a otro, y una oscilación completa dura aproximadamente un segundo. La frecuencia de un péndulo semejante es un hercio, o un ciclo por segundo.

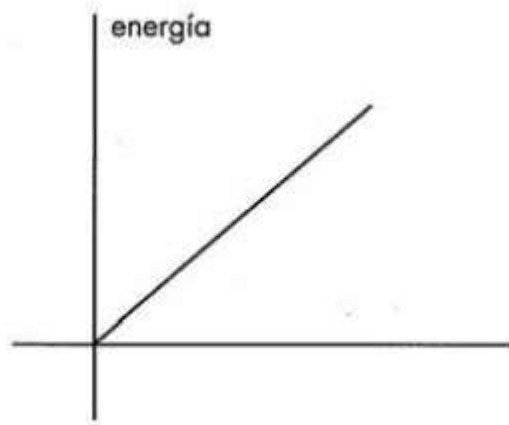


- Un peso que cuelga de un muelle sujeto al techo. Si el muelle es muy rígido, la frecuencia puede ser de varios hercios.

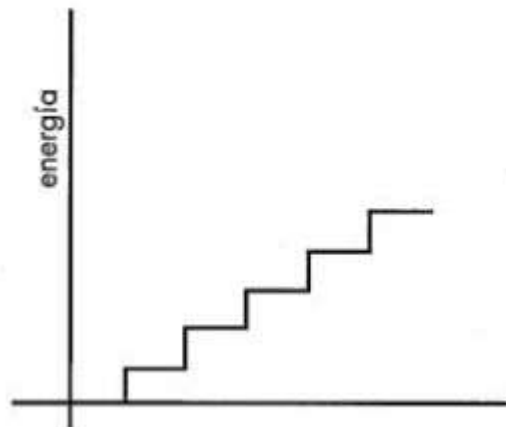


- Un diapasón vibrante o una cuerda de violín. Uno u otro pueden llegar a varios cientos de hercios.
- La corriente eléctrica en un circuito. Ésta puede oscilar a frecuencias mucho más altas.

Los sistemas que oscilan se llaman *osciladores*, lo que no puede sorprender. Todos los osciladores tienen energía, al menos si están oscilando, y en física clásica la energía puede ser cualquiera. Con ello quiero decir que se puede aumentar suavemente la energía, poco a poco si se desea, hasta cualquier valor deseado. Una gráfica que muestra cómo aumenta la energía cuando se eleva continuamente tendría esta forma:



Pero en la mecánica cuántica sucede que la energía se da en pasos pequeños e indivisibles. Cuando uno trata de aumentar poco a poco la energía de un oscilador, el resultado es una escalera en lugar de una rampa suave. La energía sólo puede incrementarse en múltiplos de una unidad llamada *cuanto de energía*.



¿Cuál es el tamaño de la unidad cuántica? Eso depende de la frecuencia de la oscilación. La regla es exactamente la misma que la que Planck y Einstein descubrieron para los cuantos de luz: el

cuanto de energía, E , es la frecuencia del oscilador, f , multiplicada por la constante de Planck, h .

$$E = hf$$

Para osciladores ordinarios tales como un péndulo, la frecuencia no es muy grande, y el escalón (el cuanto de energía) es extraordinariamente pequeño. En tal caso, el gráfico en escalera está hecho de escalones tan minúsculos que parece una rampa suave. Por eso es por lo que nunca se notará la cuantización de la energía en la experiencia ordinaria. Pero las ondas electromagnéticas pueden tener frecuencias muy grandes, en cuyo caso los escalones pueden ser muy altos. De hecho, como quizá usted ya haya imaginado, incrementar la energía de una onda electromagnética en un escalón es lo mismo que añadir un único fotón a un rayo de luz.

Para un cerebro cableado al modo clásico, el hecho de que la energía pueda sumarse sólo en cuantos indivisibles parece ilógico, pero eso es lo que implica la mecánica cuántica.

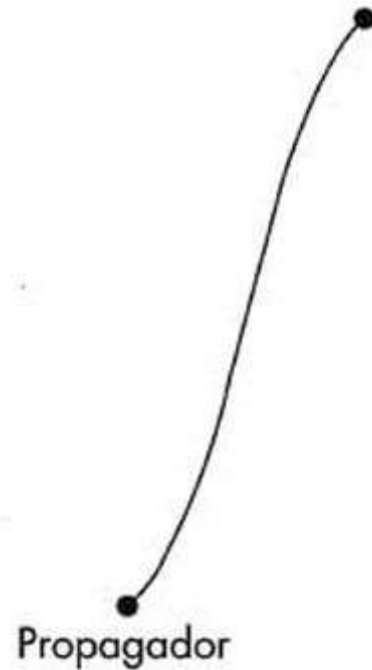
La teoría cuántica de campos

La visión del mundo que tenía Laplace en el siglo XVIII era sombría: partículas, y nada más que partículas, moviéndose en las órbitas inalterables demandadas por las despóticas ecuaciones de Newton. Me gustaría poder informarle que los físicos de hoy proporcionan una imagen más cálida y más difuminada de la realidad, pero me

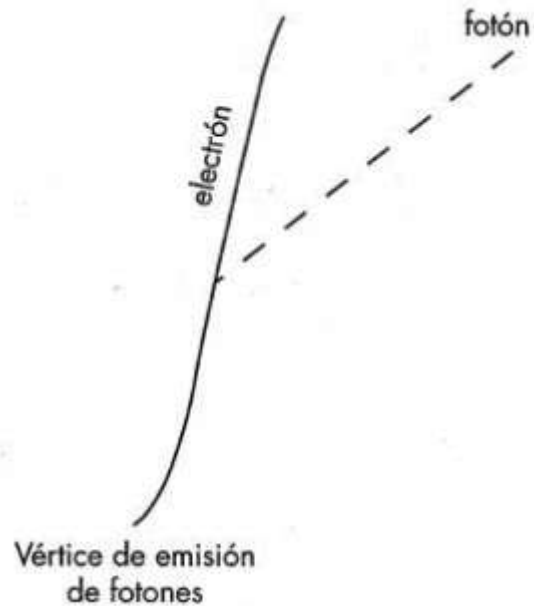
temo que no lo es. Siguen siendo sólo partículas, pero con un giro moderno. La regla de hierro del determinismo ha sido reemplazada por la regla arbitraria de la aleatoriedad cuántica.

El nuevo marco matemático que reemplazó a las leyes del movimiento de Newton se denomina teoría cuántica de campos, y según sus dictados todo el mundo natural consiste en partículas elementales que viajan de un punto a otro, chocando, dividiéndose y recomponiéndose. Es una red inmensa de líneas de universo que conectan sucesos (puntos espacio-temporales). Las matemáticas de esta gigantesca telaraña de líneas y puntos no se explica fácilmente en lenguaje profano, pero los puntos centrales son bastante claros.

En física clásica, las partículas se mueven de un punto a otro del espacio-tiempo a lo largo de trayectorias definidas. La mecánica cuántica introduce incertidumbre en su movimiento. Sin embargo, podemos pensar que las partículas viajan entre puntos espacio-temporales, aunque a lo largo de trayectorias inciertas. Estas trayectorias borrosas se denominan *propagadores*. Normalmente representamos cada propagador como una línea entre sucesos espacio-temporales, pero eso se debe sólo a que no tenemos ninguna manera de dibujar el movimiento incierto de las partículas cuánticas reales.



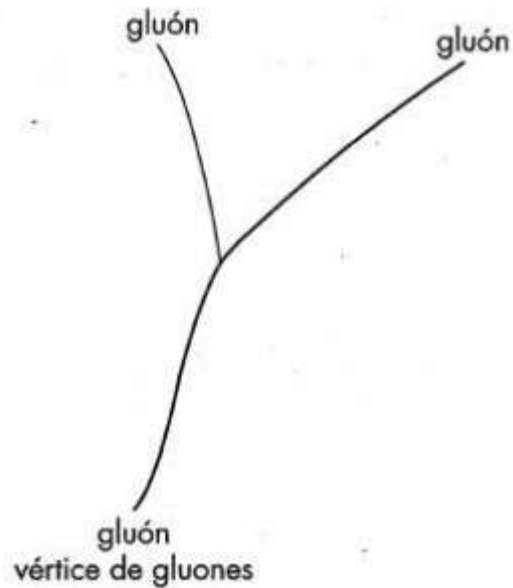
Luego vienen las interacciones, que nos dicen cómo se comportan las partículas cuando se encuentran. El proceso de interacción básico se denomina un *vértice*. Un vértice es como una bifurcación en una carretera; una partícula procede a lo largo de su línea de universo hasta que llega a la bifurcación, pero entonces, en lugar de escoger una ruta u otra, la partícula se desdobra en dos partículas, una por cada ruta. El ejemplo más conocido de un vértice es la emisión de un fotón por una partícula cargada, o electrón. En este caso, un único electrón se divide espontáneamente en un electrón y un fotón³¹. (Las líneas de universo de los fotones se dibujan tradicionalmente como líneas onduladas o como líneas de trazos).



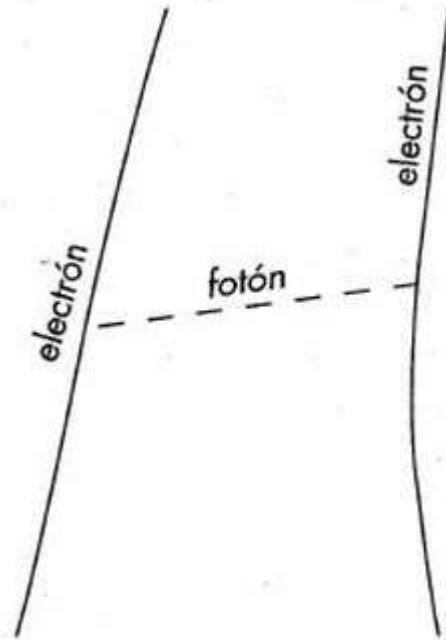
Éste es el proceso básico que produce la luz: electrones agitados de los que surgen fotones.

Hay muchos otros tipos de vértices que implican a otras partículas. También hay partículas llamadas gluones, que se encuentran en el núcleo atómico. Un gluón tiene la capacidad de dividirse en dos gluones.

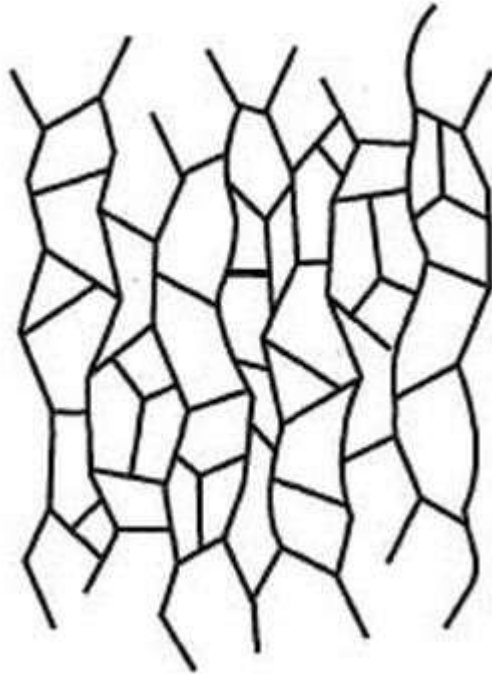
³¹ Intuitivamente, imaginamos que cuando algo se divide, cada parte es menos que el original. Ésta es una idea heredada de la experiencia común. La división de un electrón en otro electrón, y un fotón adicional, muestra lo engañosas que pueden ser nuestras intuiciones.



Algo que puede suceder hacia delante también puede suceder al revés. Esto significa que las partículas pueden juntarse y fusionarse. Por ejemplo, dos gluones pueden juntarse y fusionarse en un solo gluón. Richard Feynman nos enseñó cómo combinar propagadores y vértices para formar procesos más complicados. Por ejemplo, un diagrama de Feynman que muestra un fotón saltando de un electrón a otro, describe cómo colisionan y se dispersan los electrones.



Otro diagrama muestra cómo los gluones forman un material fibroso, complicado y pegajoso que mantiene unidos a los quarks en el núcleo.



La mecánica de Newton trata de responder a la vieja cuestión de predecir el futuro dado un estado de partida inicial, que incluye las posiciones y velocidades de un conjunto de partículas. La teoría cuántica de campos plantea la pregunta de forma diferente: dado un conjunto inicial de partículas que se mueven de cierta manera, ¿cuál es la probabilidad de los diferentes resultados?

Pero decir simplemente que la Naturaleza es probabilista (en lugar de determinista) no es toda la historia. Aunque a Laplace no le habría gustado la idea, habría entendido un mundo con un poco de aleatoriedad. Podría haber razonado de esta manera: el comportamiento de las partículas no es determinista, sino que hay una probabilidad positiva³² para cada ruta distinta que lleva del

³² En la teoría de probabilidades ordinaria, las probabilidades son siempre números positivos. Es difícil imaginar lo que podría significar una probabilidad negativa. Trate de dar sentido a la

pasado (dos electrones) al futuro (dos electrones más un fotón). Entonces, siguiendo las reglas usuales de la teoría de probabilidades, Laplace habría sumado todas las diversas probabilidades para obtener la probabilidad total final. Semejante razonamiento tendría perfecto sentido para la mente clásicamente cableada de Laplace, pero no es así como funcionan las cosas realmente. La receta correcta es extraña: no trate de grokarla; simplemente, acéptela.

La regla correcta es una de las consecuencias de la nueva y extraña «lógica cuántica» que fue descubierta por el gran físico inglés Paul Dirac inmediatamente después de los trabajos de Heisenberg y Schrödinger. Feynman estaba siguiendo el hilo de Dirac cuando dio una regla matemática que calcula una *amplitud de probabilidad* para cada diagrama de Feynman. Además, uno suma las amplitudes de probabilidad de todos los diagramas, pero no para obtener la probabilidad final. De hecho, las amplitudes de probabilidad no tienen por qué ser números positivos. Pueden ser números positivos, negativos o incluso complejos³³.

Pero la amplitud de probabilidad no es la probabilidad. Para obtener la probabilidad global —digamos, para que dos electrones se conviertan en dos electrones más un fotón— uno suma primero las amplitudes de probabilidad para todos los diagramas de Feynman. Luego, según la lógica cuántica abstracta de Dirac, toma el

siguiente frase: «Si lanzo una moneda, la probabilidad de sacar cara es menos de un tercio». Evidentemente es absurdo.

³³ Un número complejo es un número que contiene el número imaginario i , que es el símbolo matemático abstracto para la raíz cuadrada de menos uno.

resultado ¡y lo eleva al cuadrado! El resultado es siempre positivo, y es la probabilidad para ese resultado particular.

Ésta es la peculiar regla que yace en el corazón de la extrañeza cuántica. Laplace la hubiera considerado absurda, y ni siquiera Einstein pensaba que tuviera sentido. Pero la teoría cuántica de campos es una exposición increíblemente precisa de todo lo que sabemos sobre las partículas elementales, incluida la forma en que se combinan para formar núcleos, átomos y moléculas. Como dije en la introducción, los físicos cuánticos tuvieron que recablearse con nuevas reglas de la lógica³⁴.

Antes de cerrar este capítulo, quiero volver a lo que perturbó a Einstein de forma tan profunda. No lo sé con certeza, pero sospecho que tenía que ver con la naturaleza decididamente absurda de los enunciados probabilistas. Siempre me he sentido desconcertado por lo que realmente decían acerca del mundo. Por lo que puedo decir, ellas no afirman nada muy definido. En cierta ocasión escribí el siguiente relato corto, incluido originalmente en el libro de John Brockman, *Lo que creemos pero no podemos probar*, que ilustra este aspecto. La historia, «Conversación con un estudiante lento», trata de una discusión entre un profesor de física y un estudiante que apenas puede captar la idea. Cuando escribí la historia me estaba poniendo en el lugar del estudiante, no en el del profesor.

Estudiante: Hola profe. Tengo un problema. Decidí hacer un pequeño experimento sobre probabilidades —ya sabe, lanzando

³⁴ No espero que el lector profano entienda por completo la regla e incluso por qué es tan extraña. Sin embargo, confió en que le dará una idea de cómo funcionan las reglas de la teoría cuántica de campos.

monedas— y comprobar algo de eso que usted nos enseñó. Pero no funciona.

Profesor: Me gusta mucho oír que estás interesado. ¿Qué hiciste?

Estudiante: Lancé esta moneda 1000 veces. Recuerde que usted nos enseñó que la probabilidad de sacar cara es un medio. Imaginé que eso quería decir que si hago 1000 lanzamientos debería obtener 500 caras. Pero no funcionó. Yo obtuve 513. ¿Qué está mal?

Profesor: Ya, claro. Te olvidaste del margen de error. Si lanzas la moneda un cierto número de veces, entonces el margen de error es aproximadamente la raíz cuadrada del número de lanzamientos. Para 1000 lanzamientos, el margen de error es de aproximadamente 30. Así que tú resultado estaba dentro del margen de error.

Estudiante: ¡Ah!, ahora lo veo. Cada vez que haga 1000 lanzamientos siempre obtendré entre 470 y 530 caras. ¡Cada vez! Vaya, eso es un hecho con el que puedo contar.

Profesor: ¡No, no! Lo que significa es que *probablemente* sacarás entre 470 y 530.

Estudiante: ¿Quiere usted decir que podría sacar 200 caras? ¿U 850 caras? ¿O incluso todo caras?

Profesor: Probablemente no.

Estudiante: Quizá el problema es que no hice suficientes lanzamientos. ¿Debería haber continuado e intentarlo 1.000.000 veces? ¿Saldría mejor?

Profesor: Probablemente.

Estudiante: Vamos, profe. Dígame algo de lo que me pueda fiar. Usted sigue diciéndome lo que significa *probablemente* dándome

más *probablemente*. Dígame lo que significa la probabilidad sin utilizar la palabra probablemente.

Profesor: ¡Hummm! Veámoslo así: significa que me sorprendería que la respuesta estuviera fuera del margen de error.

Estudiante: ¡Dios mío! Usted quiere decir que todo eso que nos enseña sobre mecánica estadística, mecánica cuántica y probabilidad matemática... ¿todo eso significa que a usted personalmente le sorprendería que no funcionará?

Profesor: Bueno, a ver... Si yo lanzara una moneda un millón de veces estaría condenadamente seguro de que no iba a sacar todo caras. No suelo apostar, pero estaría tan seguro que me jugaría la vida o el alma. Incluso llegaría hasta el final y me jugaría el salario de un año. Estoy absolutamente seguro de que las leyes de los grandes números —la teoría de probabilidades— funcionarán y me protegerán. Toda la ciencia se basa en ello. Pero no puedo demostrarla y realmente no sé por qué funciona. Quizá esa sea la razón por la que Einstein dijo, «Dios no juega a los dados». Probablemente lo es.

De cuando en cuando oímos a físicos que afirman que Einstein no entendía la mecánica cuántica y por ello perdió el tiempo con ingenuas teorías clásicas. Dudo mucho que esto sea verdad. Sus argumentos en contra de la mecánica cuántica eran extraordinariamente sutiles, y culminaron en uno de los artículos más profundos y más citados de toda la física³⁵. Mi conjetura es que

³⁵ A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review* 47, 1935, pp. 777-780.

Einstein estaba perturbado por lo mismo que molestaba al estudiante lento. ¿Cómo iba a ser posible que la teoría definitiva de la realidad no fuera algo más concreto que nuestro propio grado de sorpresa ante el resultado de un experimento?

Le he mostrado algunas de las cosas paradójicas, casi ilógicas, a las que la mecánica cuántica obligaba a un cerebro cableado clásicamente. Pero sospecho que usted no está totalmente satisfecho. En realidad, espero que no lo esté. Si usted está confuso, es así como debería estar. El único remedio real es una dosis de cálculo infinitesimal y la inmersión durante unos meses en un buen libro de texto de mecánica cuántica. Sólo un mutante muy inusual, o una persona educada en una familia muy peculiar, podrían tener de forma natural el cableado para entender la mecánica cuántica. Recuerde, al final ni siquiera Einstein pudo grokarla.

Capítulo 5

Planck inventa un patrón de medida mejor

Un día, en la cafetería de Stanford, vi que un grupo de alumnos de mi curso de «Física para estudiantes de medicina», estaba estudiando una tabla. «¿Qué estáis estudiando?», les pregunté. La respuesta me sorprendió. Estaban memorizando, hasta la última cifra decimal, la tabla de constantes que había en la contraportada del libro de texto. La tabla incluye, junto con unas veinte más, las constantes siguientes:

$$h \text{ (constante de Planck)} = 6,626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s.}$$

$$\text{Número de Avogadro} = 6,0221415 \times 10^{23}.$$

$$\text{Carga del electrón} = 1,60217646 \times 10^{-19} \text{ culombios.}$$

$$c \text{ (velocidad de la luz)} = 299\,792\,458 \text{ m/s.}$$

$$\text{Diámetro del protón} = 1,724 \times 10^{-15} \text{ m.}$$

$$G \text{ (constante de Newton)} = 6,6742 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-2} \text{ kg}^{-1}.$$

A los estudiantes de medicina se les forma para memorizar grandes cantidades de material en sus otras asignaturas de ciencias. Son buenos estudiantes de física, pero suelen tratar de aprender la física de la misma manera que aprenden fisiología. Lo cierto es que la física requiere muy poco trabajo memorístico. Dudo que haya muchos físicos que pudieran decirle mucho más que los órdenes de magnitud aproximados de estas constantes.

Esto plantea una pregunta interesante: ¿por qué las constantes de la Naturaleza son números tan complicados? ¿Por qué no pueden

ser números sencillos, tales como 2 o 5, o incluso 1? ¿Por qué son siempre tan pequeñas (la constante de Planck, la carga del electrón) o tan grandes (el número de Avogadro, la velocidad de la luz)?

Las respuestas tienen muy poco que ver con la física y mucho con la biología. Consideremos el número de Avogadro. Éste representa el número de moléculas en cierta cantidad de gas. ¿Cuánto gas? La respuesta es una cantidad de gas con la que los físicos del siglo XIX podrían trabajar fácilmente; en otras palabras, una cantidad de gas que podía contenerse en matraces u otros recipientes que eran más o menos de tamaño humano. El valor numérico real del número de Avogadro tiene más relación con el número de moléculas en un ser humano que con cualquier profundo principio de la física³⁶.

Otro ejemplo es el diámetro de un protón: ¿por qué es tan pequeño? Una vez más, la clave está en la fisiología humana. El valor numérico en la tabla está dado en metros, pero ¿qué es un metro? Un metro es la versión métrica de la yarda inglesa, que puede referirse a la distancia desde la punta de la nariz de un hombre hasta la punta de sus dedos cuando el brazo está extendido. Con toda probabilidad era una unidad útil para medir tela o cuerda. La lección de ello es que la pequeñez del valor del tamaño del protón se debe a que se necesitan muchos protones para hacer un brazo humano. Desde el punto de vista de la física fundamental no hay nada especial en el número.

³⁶ Bien; entonces, ¿por qué los seres humanos tienen tantas moléculas? Una vez más tiene que ver con la naturaleza de la vida inteligente, no con la física fundamental. Se necesitan muchas moléculas para hacer una máquina suficientemente compleja para pensar y plantear preguntas sobre química.

Entonces, ¿por qué no cambiamos las unidades para que los números sean más fáciles de recordar? En realidad, solemos hacerlo. Por ejemplo, en astronomía se utiliza el año luz como medida de longitud. (Me exaspero cuando oigo que el año luz se utiliza mal como una unidad de tiempo, como en «Vaya, hacía años luz que no te veía»). La velocidad de la luz no es tan grande cuando se expresa en unidades de años luz por segundo. De hecho, es muy pequeña, sólo 3×10^{-8} aproximadamente. Pero ¿qué pasaría si también cambiáramos nuestras unidades de tiempo de segundos a años? Puesto que la luz tarda exactamente un año en recorrer un año luz, la velocidad de la luz es un año luz por año.

La velocidad de la luz es una de las cantidades más fundamentales en física, de modo que tiene sentido utilizar unidades en las que c es igual a uno. Pero algo como el radio del protón no es tan fundamental. Los protones son objetos complicados hechos de quarks y otras partículas, de modo que ¿por qué darles privilegios? Es mejor escoger constantes que controlen las leyes de la física más profundas y más universales. No hay discusión en cuanto a cuáles son esas leyes.

- La máxima velocidad de cualquier objeto en el universo es la velocidad de la luz, c . Esta velocidad límite no es sólo una ley sobre la luz sino una ley sobre *cualquier cosa* en la Naturaleza.
- *Todos* los objetos en el universo se atraen mutuamente con una fuerza igual al producto de sus masas por la constante de Newton, G . *Todos* los objetos significa *todos* los objetos, sin excepción.

- Para *cualquier* objeto en el universo, el producto de la masa por las incertidumbres de la posición y la velocidad nunca es menor que la constante de Planck, h .

Las cursivas son para resaltar el carácter omniabarcador de dichas leyes. Se aplican a *todas y cada una* de las cosas: a *todo absolutamente*. Estas tres leyes de la Naturaleza merecen verdaderamente ser llamadas universales, mucho más que las leyes de la física nuclear o las propiedades de cualquier partícula concreta tal como el protón. Puede parecer trivial, pero una de las intuiciones más profundas sobre la estructura de la física ocurrió en 1900 cuando Max Planck se dio cuenta de que podían escogerse unidades específicas de longitud, masa y tiempo para hacer las tres constantes básicas — c , G y h — igual a uno.

La regla de medida básica es la unidad de longitud de Planck. La longitud de Planck es mucho más pequeña que el metro o incluso que el diámetro de un protón. De hecho, es aproximadamente cien trillones de veces más pequeña que un protón (en metros, es del orden de 10^{-35}). Incluso si el protón se ampliase hasta el tamaño del Sistema Solar, la longitud de Planck no sería mayor que un virus. Siempre quedará para gloria de Planck el que advirtiera que tales dimensiones imposiblemente minúsculas deben desempeñar un papel básico en cualquier teoría definitiva del mundo físico. Él no sabía cuál sería este papel, pero podría haber conjeturado que los más pequeños bloques constituyentes de la materia serían del «tamaño de Planck».

La unidad de tiempo que necesitaba Planck para hacer c , G y h igual a uno era también inimaginablemente pequeña: a saber, 10^{-42} segundos, el tiempo que tarda la luz en recorrer una longitud de Planck.

Finalmente, existe la unidad de masa de Planck. Dado que la longitud de Planck y el tiempo de Planck son tan increíblemente pequeños (en unidades ordinarias, *bioamables*), cabría esperar que la unidad de Planck para la masa fuera mucho menor que la masa de cualquier objeto ordinario. Pero en eso nos equivocaríamos. Resulta que la unidad más básica de masa en física no es terriblemente pequeña en una escala biológica: es aproximadamente la masa de diez millones de bacterias. Es aproximadamente la masa del objeto más pequeño que puede verse a simple vista: una mota de polvo, por ejemplo.

Estas unidades —la longitud, el tiempo y la masa de Planck— tienen un extraordinario significado: son el tamaño, la semivida y la masa del agujero negro más pequeño posible. Volveremos a ello en capítulos posteriores.

$$E = mc^2$$

Tome un puchero, llénelo con cubitos de hielo, ciérrelo herméticamente y péselo en una balanza de cocina. Luego póngalo en la estufa y funda el hielo, convirtiéndolo en agua caliente. Péselo de nuevo. Si lo hace con cuidado, asegurándose de que nada entra ni sale del puchero, el peso final será el mismo que el inicial, al

menos con una precisión muy alta. Pero si pudiera hacer las medidas con una precisión de una parte en un billón, advertiría una discrepancia: el agua caliente pesaría algo más que el hielo. Por decirlo de otra manera, el calentamiento añade algunas billonésimas de kilogramo al peso.

¿Qué está pasando aquí? Bien, el calor es energía. Pero según Einstein, energía es masa, de modo que añadir calor a los contenidos del puchero incrementa su masa. La famosa ecuación $E=mc^2$ expresa el hecho de que masa y energía son la misma cosa medida en unidades diferentes. En cierto sentido, es como convertir millas en kilómetros; la distancia en kilómetros es 1,61 veces la distancia en millas. En el caso de masa y energía, el factor de conversión es el cuadrado de la velocidad de la luz.

La unidad de energía estándar de los físicos es el julio. Un centenar de julios es la energía que se requiere para iluminar una bombilla de 100 vatios durante un segundo. Un julio es la energía cinética de una masa de un kilogramo que se mueve a una velocidad de un metro por segundo. El alimento que usted ingiere cada día le proporciona aproximadamente diez millones de julios de energía. Por su parte, la unidad internacional de masa es el kilogramo, la masa de un litro de agua.

Lo que nos dice $E=mc^2$ es que masa y energía son conceptos intercambiables. Si se puede hacer desaparecer un poco de masa, se convertirá en energía —a menudo en forma de calor, pero no necesariamente—. Imaginemos que un kilogramo de masa desaparece y es reemplazado por calor. Para ver cuánto calor,

multiplicamos el kilogramo por un número muy grande: c^2 . El resultado es unos 10^{17} julios. Usted podría vivir con eso durante treinta millones de años, o podría crear un arma nuclear enorme. Por suerte, es muy difícil convertir masa en otras formas de energía, pero como demostró el Proyecto Manhattan³⁷, puede hacerse.

Para un físico los conceptos de masa y energía han llegado a estar tan íntimamente identificados que raramente nos molestamos en distinguirlos. Por ejemplo, a menudo se cita la masa del electrón como un cierto número de *electrón-voltios*, siendo el electrón-voltio una unidad de energía útil en física atómica.

Con este conocimiento, volvamos a la masa de Planck —la masa de una mota de polvo— que también podríamos llamar energía de Planck. Imaginemos la mota convertida en energía térmica gracias a algún nuevo descubrimiento. La energía sería aproximadamente la misma que la de todo un tanque de gasolina. Usted podría recorrer en automóvil Estados Unidos con diez masas de Planck.

La inimaginable pequeñez de los objetos de tamaño de Planck y las abrumadoras dificultades para observarlos directamente alguna vez son fuentes de profunda frustración para los físicos teóricos. El solo hecho de que sepamos lo suficiente para plantear estas preguntas es un triunfo de la imaginación humana. Pero es en este mundo remoto en el que tenemos que buscar la clave para las paradojas de los agujeros negros, pues son *bits de información* del tamaño de Planck los que «empapelan» densamente el horizonte de un agujero

³⁷ El desarrollo de la bomba atómica en Los Alamos, Nuevo México, durante la segunda guerra mundial.

negro. De hecho, el horizonte de un agujero negro es la forma más concentrada de información que permiten las leyes de la Naturaleza. Más tarde aprenderemos lo que se entiende por el término *información* y su concepto gemelo, *entropía*. Entonces estaremos en buena posición para entender de qué iba la guerra de los agujeros negros. Pero antes quiero explicar por qué la mecánica cuántica socava una de las conclusiones más sólidas de la relatividad general: la naturaleza eterna de los agujeros negros.

Capítulo 6

En un bar de Broadway

La primera conversación que tuve con Richard Feynman fue en el West End Café de Broadway en el alto Manhattan. Fue en 1972. Yo era un físico de treinta y dos años y relativamente desconocido; Feynman tenía cincuenta y tres. Incluso si ya no estaba en el punto más alto de sus capacidades, el león maduro seguía siendo una figura imponente. Feynman había venido a la Universidad de Columbia para dar una conferencia sobre su nueva teoría de partones. *Partón* era el término de Feynman para las hipotéticas partes constituyentes de las partículas subnucleares tales como protones, neutrones y mesones. Hoy los llamamos quarks y gluones. En ese momento, Nueva York era un centro importante en la física de altas energías. El punto focal era el departamento de física en Columbia. La física en Columbia tenía una historia gloriosa y distinguida. I. I. Rabi, un pionero de la física norteamericana, había establecido Columbia como una de las instituciones de física más prestigiosas del mundo, pero en 1972 la reputación de Columbia estaba en declive. El programa de física teórica en la Belfer Graduate School of Science de la Universidad Yeshiva, donde yo era profesor, era al menos tan bueno, pero Columbia era Columbia, y Belfer, estaba mucho menos reconocido.

La conferencia de Feynman venía precedida de una enorme excitación. Él ocupaba un lugar muy especial en el corazón y la mente de los físicos. No sólo era uno de los más grandes físicos

teóricos de todos los tiempos, sino que era un héroe para todos. Actor, comediante, tocador de bongos, travieso, iconoclasta, gigante intelectual... hacía que todo pareciera fácil. Todos los demás se esforzaban durante horas en cálculos complicados para resolver un problema de física, pero Feynman explicaba en veinte segundos por qué la respuesta era obvia.

El ego de Feynman era inmenso, pero era muy divertido estar con él. Algunos años más tarde, él y yo nos hicimos buenos amigos, pero en 1972 él era una celebridad y yo era un fan de los que hacen cola en la puerta del teatro, procedente de las tierras remotas de la calle 181. Llegué a Columbia en metro dos horas antes de la conferencia, confiando en cruzar algunas palabras con el gran hombre.

El departamento de física teórica estaba en la novena planta de Pupin Hall. Imaginé que Feynman estaría allí. La primera persona a la que vi fue a T. D. Lee, el mandarín de la física en Columbia. Le pregunté si el profesor Feynman estaba por ahí. «¿Qué quiere usted?», fue la amable respuesta de Lee. «*Bueno, quiero hacerle una pregunta sobre los partones*». «*Está ocupado*». Fin de la conversación. Eso habría sido el final de la historia, salvo por la llamada de la Naturaleza. Cuando entré en el servicio de caballeros, vi a Dick delante de una pila. Acercándome tímidamente, dije, «Profesor Feynman, ¿puedo hacerle una pregunta?». «Sí, pero déjeme acabar lo que estoy haciendo, y luego podemos ir al despacho que me han dado. ¿De qué trata la pregunta?». En ese momento decidí que realmente no tenía una pregunta sobre partones, pero podía

pergeñar una sobre agujeros negros. El término *agujero negro* había sido acuñado por John Wheeler cuatro años antes. Wheeler había sido el tutor de tesis de Feynman, pero Feynman me dijo que él no sabía casi nada de agujeros negros. Lo poco que yo sabía lo había aprendido de mi amigo David Finkelstein, uno de los pioneros de la física de los agujeros negros. En 1958 Dave había escrito un influyente artículo donde explicaba que el horizonte de un agujero negro era un punto de no retorno. Entre las pocas cosas que yo sabía estaba que un agujero negro tenía una singularidad en el centro y un horizonte que rodeaba a la singularidad. Dave también me había explicado por qué nada podía escapar de detrás del horizonte. La última cosa que sabía, aunque no puedo recordar como la conocí, era que una vez formado un agujero negro, no podía dividirse ni desaparecer. Dos o más agujeros negros podían fusionarse y formar un agujero negro más grande, pero nada podía hacer que un agujero negro se dividiese en dos o más agujeros negros. En otras palabras, una vez formado un agujero negro, no había manera de deshacerse de él.

Aproximadamente en esa época, el joven Stephen Hawking estaba revolucionando la teoría clásica de los agujeros negros. Entre sus descubrimientos más importantes estaba el hecho de que el área del horizonte de un agujero negro no puede disminuir nunca. Stephen y sus colaboradores, James Bardeen y Brandon Carter, habían utilizado la teoría de la relatividad general para deducir un conjunto de leyes que gobiernan el comportamiento de los agujeros negros. Las nuevas leyes tenían un inesperado parecido con las leyes de la

termodinámica (las leyes del calor), aunque se suponía que esta similitud era una pura coincidencia. La regla que dice que el área nunca decrece era análoga a la segunda ley de la termodinámica, que afirma que la entropía de un sistema nunca puede disminuir. Dudo que yo supiera de este trabajo, o incluso del nombre de Stephen Hawking, en el momento de la conferencia de Feynman, pero las leyes de Stephen para la dinámica de los agujeros negros llegarían a tener un efecto decisivo en mi investigación durante más de veinte años.

En cualquier caso, la pregunta que yo quería plantear a Feynman era si la mecánica cuántica podía hacer que un agujero negro se desintegrara rompiéndose en agujeros negros más pequeños. Yo pensaba en algo similar a la fragmentación de un núcleo muy grande en núcleos más pequeños. Expliqué apresuradamente a Feynman por qué pensaba que podía suceder.

Feynman dijo que nunca había pensado en ello. Y lo que es más, él había llegado a despreciar el tema de la gravedad cuántica. Los efectos de la mecánica cuántica sobre la gravedad, o de la gravedad sobre la mecánica cuántica, eran demasiado minúsculos para que se pudieran medir alguna vez. No es que él pensara que el tema careciese de interés, pero sin efectos experimentales medibles para guiar la teoría no había esperanzas en conjeturar cómo funcionaba realmente. Decía que había pensado en ello años antes y no quería empezar a pensar en ello de nuevo. Conjeturaba que podrían pasar quinientos años antes de que la gravedad cuántica fuera entendida.

En cualquier caso, decía, que tenía que dar una conferencia dentro de una hora y necesitaba descansar.

La conferencia fue puro Feynman. Su presencia llenaba el escenario; era un personaje desbordante, con un acento de Brooklyn y un lenguaje corporal con el que ilustraba cada punto. La audiencia estaba hipnotizada. Él nos mostró cómo pensar en difíciles problemas en teoría cuántica de campos de una manera simple e intuitiva. Casi todos los demás estaban utilizando otro método más antiguo para analizar los problemas que él estaba abordando. El método antiguo era más difícil, pero él había encontrado un truco que hacía todo fácil: el truco del partón. Feynman movía su varita mágica y aparecían todas las respuestas. Lo irónico es que el viejo método se basaba en los diagramas de Feynman.

Para mí, lo mejor de la conferencia fue cuando T. D Lee interrumpió para hacer una pregunta —o, mejor dicho, para hacer una afirmación disfrazada de pregunta. Feynman había afirmado que cierto tipo de diagrama no se daba nunca en su nuevo método, y eso simplificaba las cosas. Se denominaba un diagrama-Z. Lee preguntó, «¿No es cierto que en algunas teorías con campos vectoriales y espinoriales los diagramas-Z no siempre dan cero? Yo creo que probablemente puede corregirse». En la sala se hizo un silencio sepulcral. Feynman miró al mandarín durante cinco segundos, y luego dijo, «¡Corrígelo!». Luego continuó.

Después de la conferencia, Feynman se me acercó y me preguntó «¿Cómo se llama usted?». Dijo que había pensado sobre mi pregunta

y quería hablar de ello. ¿Conocía yo algún lugar donde pudiéramos encontrarlos más tarde? Así es como acabamos en el West End Café.

Volveremos al café, pero primero tengo que contarle algunos puntos adicionales sobre gravedad y mecánica cuántica.

La cuestión que yo quería discutir tenía que ver con los efectos de la mecánica cuántica sobre los agujeros negros. La teoría de la relatividad general es una teoría clásica de la gravedad. Cuando un físico utiliza el término clásico no quiere decir que proceda de la Antigua Grecia. Simplemente significa que la teoría no incluye los efectos de la mecánica cuántica. Se entendía muy poco acerca de cómo influye la teoría cuántica en el campo gravitatorio, pero se sabía que ese poco tenía que ver con pequeñas perturbaciones que se propagan a través del espacio como *ondas gravitatorias*. Feynman había aportado mucho de lo que sabíamos sobre la teoría cuántica de dichas perturbaciones.

En el capítulo 4 aprendimos que, al parecer, Dios ignoró a Einstein con respecto al juego de dados. La cuestión, por supuesto, es que las cosas que son seguras en física clásica se hacen inciertas en física cuántica. La mecánica cuántica nunca nos dice lo que va a suceder; lo que nos dice es la probabilidad de que suceda una cosa u otra. El momento exacto en que se desintegrará un átomo radioactivo es impredecible, pero la mecánica cuántica nos dice que probablemente se desintegrará en los próximos diez segundos.

El físico Murray Gell-Mann, ganador del premio Nobel, tomó prestado este lema del *Camelot* de T. H. White: «Todo lo que no está

prohibido es obligatorio». En particular, hay muchos sucesos en física clásica que sencillamente no pueden suceder. En muchos casos, sin embargo, esos mismos sucesos son posibles en la teoría cuántica. En lugar de ser imposibles, estos sucesos son sólo muy improbables. Pero por improbables que sean, si uno espera el tiempo suficiente, finalmente sucederán. Por ello, todo lo que no está prohibido es obligatorio.

Un buen ejemplo es un fenómeno llamado *efecto túnel*. Imaginemos un coche aparcado en una colina con una hondonada.



Ignoremos todas las cosas irrelevantes tales como la fricción y la resistencia del aire. Supongamos que el conductor suelta el freno de mano de modo que el automóvil está libre para moverse. Es evidente que si el automóvil está aparcado en el fondo de la hondonada, no empezará a moverse de repente. El movimiento en cualquier dirección supondría ir cuesta arriba, y si el automóvil está inicialmente en reposo, no tiene energía para moverse cuesta arriba. Si más tarde encontráramos que el automóvil ha rodado cuesta abajo más allá de la hondonada, supondríamos que o alguien lo había empujado o había obtenido la energía para salir de la

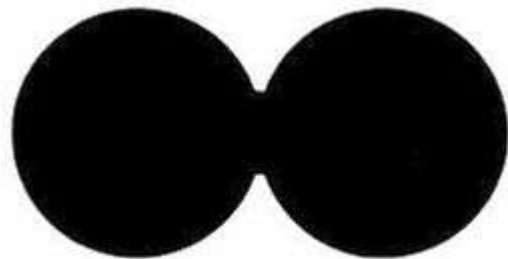
hondonada de alguna otra manera. Salir espontáneamente de la hondonada sería imposible en mecánica clásica.

Pero recuerde, todo lo que no está prohibido es obligatorio. Si el automóvil fuera mecano-cuántico (como todos los automóviles son realmente), nada le impediría aparecer repentinamente al otro lado de la hondonada. Podría ser muy improbable —y para un objeto grande y pesado como un automóvil sería muy, muy improbable— pero no sería imposible. Por eso, dado el tiempo suficiente, sería obligatorio. Si esperásemos el tiempo suficiente encontraríamos el automóvil rodando cuesta abajo al otro lado de la hondonada. Este fenómeno se llama efecto túnel porque sería como si el automóvil hubiese salido de la hondonada a través de un túnel. Para un objeto tan masivo como un automóvil, la probabilidad de que salga por efecto túnel es tan pequeña que se necesitaría una enorme cantidad de tiempo (en promedio) para que el coche aparezca espontáneamente al otro lado de la hondonada. Escribir un número suficientemente grande para expresar esta cantidad de tiempo requeriría tantas cifras que, incluso si cada cifra no fuera mayor que un protón y estuviesen muy apretadas, las cifras llenarían sobradamente el universo. Sin embargo, exactamente el mismo efecto puede permitir que una partícula alfa (dos protones y dos neutrones) escape de un núcleo por efecto túnel, o que un electrón atraviese por efecto túnel un hueco en un circuito.

Lo que yo estaba imaginando ese día de 1972 es que aunque los agujeros negros clásicos tienen una forma fija, las fluctuaciones cuánticas pueden hacer que la forma del horizonte oscile.

Normalmente, la forma de un agujero negro sin rotación es una esfera perfecta, pero una fluctuación cuántica debería poder deformarlo brevemente y darle una forma aplanada u oblonga. Además, ocasionalmente una fluctuación puede ser tan grande que el agujero negro se deformará hasta

casi convertirse en un par de esferas más pequeñas conectadas por una estrecha garganta. En esta situación es fácil que se divida. Los núcleos pesados se dividen espontáneamente de este modo, así que ¿por qué no



Mi idea sobre la desintegración de los agujeros negros

un agujero negro? Clásicamente no puede suceder, de la misma forma que el automóvil no puede salir de la hondonada espontáneamente. Pero ¿está absolutamente prohibido? Yo no podía ver ninguna razón. Esperemos el tiempo suficiente, pensaba yo, y el agujero negro se dividirá en dos agujeros negros más pequeños.

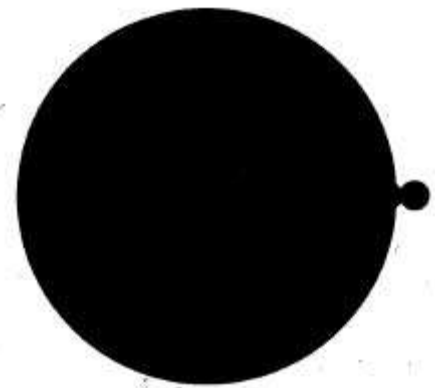
Volvamos ahora al West End Café. Acariciando una cerveza, esperé a Feynman en el café durante casi media hora. Cuanto más pensaba sobre ello, más sentido parecía tener. El agujero negro podía desintegrarse por efecto túnel cuántico, primero en dos partes, luego en cuatro, ocho, y finalmente en un gran número de componentes microscópicos. A la luz de la mecánica cuántica no tenía sentido pensar que los agujeros negros eran permanentes.

Feynman entró en el café sólo un minuto o dos después y se acercó a donde yo estaba sentado. Yo estaba eufórico, de modo que pedí dos cervezas. Antes de que yo tuviera oportunidad de pagar, él sacó

su billetero y puso la cantidad pedida. No sé si dejó propina. Yo bebí mi cerveza, pero advertí que la jarra de Feynman nunca dejó la mesa. Empecé a reexponer mi argumento y terminé diciendo que pensaba que el agujero negro debería desintegrarse finalmente en piezas minúsculas. ¿Qué podrían ser esas piezas minúsculas? Estaba implícito que la única respuesta razonable eran partículas elementales tales como fotones, electrones y positrones.

Feynman estaba de acuerdo en que no había nada que impidiera que esto suceda, pero pensaba que yo tenía una imagen equivocada. Yo había visualizado el agujero negro dividiéndose primero en fragmentos más o menos iguales. Cada fragmento se dividiría por la mitad, hasta que los fragmentos fueran microscópicos.

El problema estaba en que sería necesaria una gigantesca fluctuación cuántica para que un agujero negro grande se divida por la mitad. Feynman pensaba que había una imagen más plausible en la que el horizonte se dividiría en un fragmento casi igual al horizonte original y un segundo fragmento microscópico que saldría



Idea de Feynman sobre la desintegración de los agujeros negros

despedido. A medida que se repitiera el proceso, el agujero negro grande se contraería hasta que no quedara nada. Eso sonaba bien. Un minúsculo fragmento del horizonte desgajado parecía mucho más probable que la división del agujero negro en dos fragmentos grandes.

La conversación duró casi una hora. Yo no recuerdo haber dicho adiós, ni que hiciésemos planes de continuar la idea. Yo había conocido al león, y no me había decepcionado.

Si hubiéramos pensado más sobre el problema, podríamos habernos dado cuenta de que muy probablemente la gravedad atraería de nuevo a los minúsculos fragmentos al horizonte. Algunos fragmentos expulsados podrían colisionar con los fragmentos que caen. La región inmediatamente por encima del horizonte sería un complejo revoltijo de fragmentos en colisión que podrían calentarse por las colisiones repetidas. Incluso podríamos habernos dado cuenta de que la región inmediatamente por encima del horizonte sería una masa informe de partículas que formaría una atmósfera caliente. Y podríamos habernos dado cuenta de que esta masa calentada se comportaría como cualquier objeto calentado e irradiaría su energía como radiación térmica. Pero no lo hicimos. Feynman volvió a sus partones, y yo volví al problema de qué mantiene a los quarks confinados en el interior de los protones.

Ahora es el momento de que le diga exactamente qué significa *información*. Información, entropía y energía son tres conceptos inseparables que constituyen el tema del próximo capítulo.

Capítulo 7

Energía y entropía

Energía

La energía es una transformista. Como los transformistas míticos que podían cambiar de humano a animal, a planta o a roca, la energía también puede cambiar de forma. Cinética, potencial, química, eléctrica, nuclear y térmica (calor) son algunas de las muchas formas que la energía puede adoptar. Se está transmutando constantemente de una forma a otra, pero hay una constante: la energía se conserva; la suma total de todas las formas de energía no cambia nunca.

He aquí algunos ejemplos de transformismo:

- Sísifo está bajo de energía. Por eso, antes de empujar por enésima vez su roca hasta lo alto de la colina, se detiene para reponer fuerzas tomando miel. Cuando la roca llega a la cima, el condenado observa mientras la gravedad la hace rodar de nuevo hasta abajo por enésima más una vez. El pobre Sísifo está condenado a convertir eternamente energía química (miel) en energía potencial y luego en energía cinética. Pero espere: ¿qué sucede con la energía cinética de la roca cuando rueda y se queda en reposo al pie de la colina? Se convierte en calor. Algo de calor fluye a la atmósfera y al suelo. Incluso Sísifo se acalora con el esfuerzo. El ciclo de conversión de energía de Sísifo es como sigue:

química → potencial → cinética → térmica

- El agua fluye hacia las Cataratas del Niágara y toma velocidad. El agua que fluye, cargada con energía cinética, es dirigida hacia la boca de una turbina, donde hace girar las palas. Se produce electricidad que fluye a través de cables. ¿Puede usted seguir la transformación? Aquí está:

potencial → cinética → eléctrica

Además, parte de la energía se convierte en calor no aprovechable: el agua que sale de la turbina está más caliente que el agua que entra.

- Einstein proclamó que masa es energía. Lo que Einstein quería decir cuando dijo $E = mc^2$ era que todo objeto tiene una energía latente que puede liberarse si su masa puede cambiar de alguna forma. Por ejemplo, un núcleo de uranio se dividirá con el tiempo en un núcleo de torio y un núcleo de helio. El torio y el helio sumados tienen una masa ligeramente menor que el uranio original. Ese pequeño exceso de masa se transformará en la energía cinética de los núcleos de torio y helio y también unos pocos fotones. Cuando los átomos llegan al reposo y los fotones son absorbidos, el exceso de energía se convierte en calor.

De todas las formas habituales de energía, el calor es la más misteriosa. ¿Qué es? ¿Es una sustancia como el agua, o es algo más efímero? Antes de la moderna teoría molecular del calor, los primeros físicos y químicos pensaban que era una sustancia y que se comportaba como un fluido. La llamaban *flogisto* e imaginaban

que fluía desde los objetos calientes a los fríos, enfriando los calientes y calentando los fríos. De hecho, aún hablamos del flujo de calor.

Pero el calor no es una nueva sustancia; es una forma de energía. Contráigase usted hasta tomar el tamaño de una molécula y mire a su alrededor el agua caliente en una bañera. Podrá ver las moléculas que se mueven aleatoriamente y chocan unas con otras en una danza caótica y agitada. Enfríe el agua y mire de nuevo a su alrededor: las moléculas se mueven más lentamente. Enfríela hasta el punto de congelación, y las moléculas se quedan bloqueadas en un cristal de hielo sólido. Pero incluso en el hielo, las moléculas siguen vibrando. Sólo dejan de moverse (ignorando el movimiento de punto cero cuántico) cuando se ha drenado toda la energía. En ese momento, cuando el agua está a 273 grados centígrados bajo cero, o cero absoluto, la temperatura ya no puede reducirse más. Cada molécula está rígidamente bloqueada en su lugar, en una perfecta red cristalina; ya no hay ninguna confusión ni movimiento caótico. La conservación de la energía cuando cambia de calor a otras formas se denomina a veces la *Primera Ley de la Termodinámica*.

Entropía

No sería una buena idea que usted dejara aparcado su BMW en la selva durante quinientos años. Cuando volviera, encontraría un montón de herrumbre. Eso es el incremento de entropía. Si dejará el montón de herrumbre durante otros quinientos años, podría estar completamente seguro de que no se transformaría de nuevo en un

BMW que funcionara. Eso, en resumen, es la segunda ley de la termodinámica: la entropía aumenta. Todo el mundo —poetas, filósofos, fanáticos de los ordenadores— habla de la entropía, pero ¿qué es exactamente? Para responder a esta pregunta, consideremos más detenidamente la diferencia entre el BMW y el montón de herrumbre. Ambos son conjuntos de unos 10^{28} átomos, principalmente de hierro (y en el caso de la herrumbre, también oxígeno). Imagine que usted tomara esos átomos y los juntará al azar. ¿Cuál es la probabilidad de que se juntaran para formar un automóvil que funcionara? Se necesitaría una gran destreza para decir cuán poco probable sería, pero creo que todos estaremos de acuerdo en que sería extraordinariamente improbable. Obviamente, sería mucho más probable que usted se encontrara con un montón de herrumbre que con un automóvil de un nuevo modelo. O incluso con uno viejo y oxidado. Si separara los átomos y los juntará de nuevo una y otra y otra vez, finalmente obtendría un automóvil, pero hasta entonces tendría muchos más montones de herrumbre. ¿Por qué? ¿Qué hay tan especial en el automóvil, o en el montón de herrumbre?

Si usted imaginara todas las formas posibles de reunir los átomos, la aplastante mayoría de las configuraciones parecerían montones de herrumbre. Una fracción mucho más pequeña se parecería a un automóvil. Pero incluso entonces, si usted mirara bajo la cubierta, muy probablemente encontraría un montón de herrumbre. Una fracción todavía más minúscula de las configuraciones formaría un automóvil operativo. La entropía de un automóvil y la entropía de

un montón de herrumbre tienen que ver con el número de configuraciones que reconoceríamos como montones de herrumbre frente al número de ellas que reconoceríamos como un automóvil. Si usted agitara los átomos de un automóvil, sería mucho más probable obtener un montón de herrumbre porque hay muchas más configuraciones de montones de herrumbre que configuraciones de automóvil.

Otro ejemplo. Un mono que teclea en una máquina de escribir casi siempre escribirá sinsentidos. Muy raramente escribirá una frase gramaticalmente correcta tal como «Quiero arbitrar mi hipotenusa con el punto y coma». Menos frecuentemente incluso, escribirá una frase con sentido tal como «El Rey Canuto tenía verrugas en su barbilla». Y lo que es más, si usted toma las letras de una frase con sentido y las revuelve como las fichas en el Scrabble, el resultado casi siempre será un galimatías. ¿La razón? Hay muchas más formas de ordenar veinte o treinta letras sin que el resultado tenga sentido que formas que den lugar a frases significativas.

El alfabeto tiene veintiocho letras, pero hay sistemas de escritura más sencillos. El código Morse es un sistema muy simple, que utiliza sólo dos símbolos: punto y raya. Estrictamente hablando, hay tres símbolos —punto, raya y espacio— pero siempre se podría reemplazar el espacio por alguna serie especial de puntos y rayas que, de lo contrario, sería muy poco probable que ocurriera. En cualquier caso, ignorando el espacio, he aquí la descripción del Rey Canuto y sus verrugas en código Morse —ochenta y nueve símbolos en total.



¿Cuántos mensajes en código Morse distintos podrían hacerse con ochenta y nueve puntos y/o rayas? Todo lo que tiene que hacer es multiplicar 2 por sí mismo 89 veces para obtener 2^{89} , que es aproximadamente mil cuatrillones.

Cuando la información está codificada en términos de dos símbolos —podrían ser puntos y rayas, unos y ceros, o cualquier otro par— los símbolos se denominan *bits*. Así, en código Morse, «El Rey Canuto tenía verrugas en su barbilla» es un mensaje de 89 bits. Si usted va a leer el resto de este libro, sería una buena idea que memorizase la definición del término técnico bit. Su significado no es el mismo que cuando usted dice «Pondré un poco de leche en mi caféⁱⁱⁱ». Un bit es una unidad de información irreducible, como los puntos y las rayas en el código Morse.

¿Por qué nos tomamos la molestia de reducir la información a puntos y rayas, o a ceros y unos? ¿Por qué no utilizar secuencias de 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 o, mejor todavía, las letras del alfabeto? Los mensajes serían mucho más fáciles de leer, y necesitarían mucho menos espacio.

La cuestión es que el alfabeto (o los diez símbolos numerales ordinarios) es una construcción humana que aprendemos a reconocer y almacenar en nuestra memoria. Pero cada letra o numeral ya tiene una gran cantidad de información; por ejemplo, en

la intrincada diferencia entre las letras A y B o entre los números 5 y 8. Los telegrafistas y los científicos de la computación, que se basan sólo en las reglas matemáticas más simples, prefieren —en realidad, están casi obligados— utilizar el *código binario* de puntos y rayas o ceros y unos. De hecho, cuando Carl Sagan diseñó un sistema para enviar mensajes a civilizaciones no humanas que vivieran en sistemas solares lejanos, utilizó un código binario.

Volvamos al Rey Canuto. ¿Cuántos de los mensajes de 89 bits son frases *coherentes*? Realmente no lo sé, quizá algunos miles de millones. Pero cualquiera que sea este número, es una fracción infinitesimal de 2^{89} . Por lo tanto, es casi seguro que si usted toma los 89 bits, o las treinta y seis letras de «El Rey Canuto tenía verrugas en su barbilla» y las baraja, el resultado será un galimatías. Dejando aparte los espacios, esto es lo que yo obtuve cuando lo hice con fichas de Scrabble:

REEVIYCNLULOBTERAERGARASELNSTUANBIA

Supongamos que usted revuelve unas pocas letras cada vez. La frase pierde poco a poco su coherencia. «El Rey Canuto tenía verrugas en su barbilla» sigue siendo reconocible. También lo es «El Rey Canuto tenía verrugas e su barbillan». Pero poco a poco las letras se convertirán en un revoltijo sin sentido. Hay tantísimas combinaciones sin significado que la tendencia hacia el galimatías es inevitable.

Ahora puedo darle una definición de entropía.

La entropía es una medida del número de configuraciones que se adecúan a un criterio reconocible específico.

Si el criterio es que hay 89 bits, entonces el número de configuraciones es 2^{89} .

Pero la entropía *no* es el número de configuraciones, en este caso 2^{89} . Es simplemente 89 —el número de veces que hay que multiplicar 2 por sí mismo para obtener el número de configuraciones. El término matemático para el número de veces que debe multiplicarse 2 por sí mismo para obtener un número dado se llama su *logaritmo*³⁸. Así, 89 es el logaritmo de 2^{89} . La entropía es, por lo tanto, el logaritmo del número de configuraciones.

De las 2^{89} posibilidades, sólo una fracción muy pequeña son realmente frases con significado. Conjeturemos que son mil millones. Para hacer mil millones, usted tiene que multiplicar unos 30 factores de 2. En otras palabras, mil millones es aproximadamente 2^{30} o, lo que es equivalente, 30 es el logaritmo de mil millones. Se sigue de ello que la entropía de las frases significativas es aproximadamente 30, que es mucho menor que 89.

³⁸ Estrictamente hablando, éste es el logaritmo en base 2. Hay otras definiciones de logaritmos. Por ejemplo, en lugar tomar como base el número 2, está el número de veces que 10 debe multiplicarse por sí mismo para obtener un número dado. Esto se definiría como el *logaritmo en base 10*. No hace falta decir que se necesitan menos 10 que 2 para dar un número dado.

La definición física oficial de entropía es el número de veces que hay que multiplicar en número matemático e . Este número «exponencial» es aproximadamente igual a $e=2,71828183$. En otras palabras, la entropía es el *logaritmo natural* o *logaritmo en base e* , mientras que el número de bits (89 en el ejemplo) es el *logaritmo en base 2*. El logaritmo natural es menor que el número de bits en un factor de aproximadamente 0,7. Así que, para los puristas, la entropía de un mensaje de 89 bits es $0,7 \times 89$, que es aproximadamente igual a 62. En este libro ignoraré esta diferencia entre bits y entropía.

Los revoltijos de símbolos sin significado tienen claramente más entropía que las combinaciones que enuncian frases coherentes. Apenas puede sorprender que la entropía aumente cuando usted revuelve las letras.

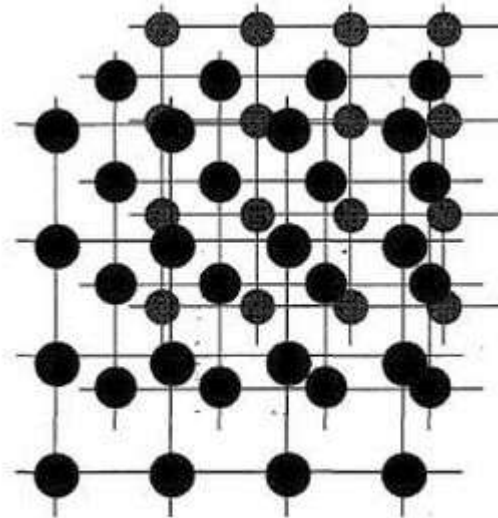
Supongamos que la compañía BMW mejora su control de calidad hasta el punto de que todos los automóviles que salgan de la línea de montaje sean idénticos. En otras palabras, supongamos que hubiera una, y sólo una, configuración atómica que sería aceptada como un verdadero BMW. ¿Cuál sería su entropía? La respuesta es cero. No habría ninguna incertidumbre sobre ningún detalle cuando un BMW saliera de la línea de montaje. Cuando quiera que se especifique una configuración única, no hay entropía en absoluto.

La segunda ley de la termodinámica, que dice que la entropía aumenta, es sólo una manera de decir que con el paso del tiempo tendemos a perder la pista de los detalles. Imaginemos que echamos una pequeña gota de tinta en un vaso de agua caliente. Al principio sabemos dónde está localizada exactamente la gota de tinta. El número de configuraciones posibles de la tinta no es demasiado grande. Pero conforme observamos que la tinta se difunde en el agua, empezamos a saber cada vez menos sobre las localizaciones de las moléculas de tinta individuales. El número de configuraciones que corresponden a lo que vemos —a saber, un vaso de agua de un gris uniforme— se ha hecho enorme. Podemos esperar y esperar, pero no veremos que la tinta se vuelva a reunir en una gota concentrada. La entropía aumenta. Eso es la segunda

ley de la termodinámica. Las cosas tienden hacia una monótona uniformidad.

He aquí otro ejemplo más: una bañera llena de agua caliente. ¿Cuánto sabemos sobre el agua en la bañera? Supongamos que lleva en la bañera el tiempo suficiente para que no haya movimiento detectable.

Podemos medir la cantidad de agua en la bañera (200 litros), y podemos medir la temperatura (30 grados centígrados). Pero la bañera está llena de moléculas de agua y obviamente hay un número muy grande de configuraciones moleculares que corresponden a las condiciones dadas, es decir, 200



Red cristalina

litros de agua a 30 grados centígrados. Podríamos saber mucho más si pudiéramos medir cada átomo con precisión.

La entropía es una medida de cuánta información está oculta en los detalles —detalles que, por una u otra razón, son demasiado difíciles de observar. Así pues, *la entropía es información oculta*. En muchos casos, la información está oculta porque concierne a cosas que son demasiado pequeñas para ver y demasiado numerosas para controlar. En el caso del agua de la bañera, estas cosas son los detalles microscópicos de las moléculas de agua, la localización y el movimiento de cada una de los miles de billones de billones de moléculas individuales en la bañera.

¿Qué sucede con la entropía si el agua se enfría hasta que su temperatura sea el cero absoluto? Si eliminamos toda la energía del agua, las moléculas se dispondrán en una configuración única, la red congelada que forma un perfecto cristal de hielo.

Incluso si las moléculas son demasiado pequeñas para que se puedan ver, si usted está familiarizado con las propiedades de los cristales puede predecir la posición de cada molécula. Un cristal perfecto, como un BMW perfecto, no tiene ninguna entropía.

¿Cuántos bits puede amontonar en una biblioteca?

La ambigüedad y la sutileza en el uso del lenguaje suelen ser muy valoradas. De hecho, si las palabras tuvieran significados perfectamente precisos que pudieran programarse en un ordenador, el lenguaje y la literatura se empobrecerían. Pero la precisión en ciencia requiere un alto grado de exactitud lingüística. La palabra *información* puede significar muchas cosas: «Creo que tu información es falsa». «Para tu información, Marte tiene dos lunas». «Yo tengo un máster en ciencias de la información». «Puede encontrar la información en la Biblioteca del Congreso». En cada una de las frases, la palabra información se está utilizando de una manera específica. Sólo en la última frase tiene sentido preguntar: «¿Dónde está localizada la información?».

Continuemos con esta idea de localización. Si yo le dijera que Grant está enterrado en la Tumba de Grant, sin duda estaríamos de acuerdo en que le he dado un elemento de información. Pero ¿dónde está esa información? ¿Está en su cabeza? ¿En mi cabeza? ¿Es algo

demasiado abstracto para tener una localización? ¿Está dispersa por todo el universo para que cualquiera la utilice en cualquier parte?

He aquí una respuesta muy concreta: la información está en la página, almacenada en forma de letras físicas compuestas de carbono y otras moléculas. En este sentido, la información es algo concreto, casi una sustancia. Es tan concreta que la información en su libro y en mi libro es información diferente. En su libro, dice que Grant está enterrado en la Tumba de Grant. Usted puede sospechar que dice lo mismo en mi libro, pero no lo sabe con seguridad. Quizá mi libro diga que Grant está enterrado en la Gran Pirámide de Guiza. De hecho, ninguno de los dos libros contiene la información. La información de que Grant está enterrado en la Tumba de Grant está en la Tumba de Grant.

En el sentido en que los físicos utilizan la palabra, la información está hecha de materia³⁹ y se encuentra en alguna parte. La información en este libro está en un volumen rectangular de espacio de aproximadamente 25 centímetros por 15 centímetros por 3 centímetros —es decir, $25 \times 15 \times 3$, o 1125 centímetros cúbicos⁴⁰. ¿Cuántos bits de información están ocultos entre las cubiertas del libro? En una línea impresa hay lugar para unos 70 caracteres —letras, signos de puntuación y espacios. A 37 líneas por página y 350 páginas, eso hace casi un millón de caracteres.

³⁹ Cuando los físicos utilizan la palabra *materia*, no se refieren solamente a cosas hechas de átomos. Otras partículas elementales, tales como fotones, neutrinos y gravitones, también cuentan como materia.

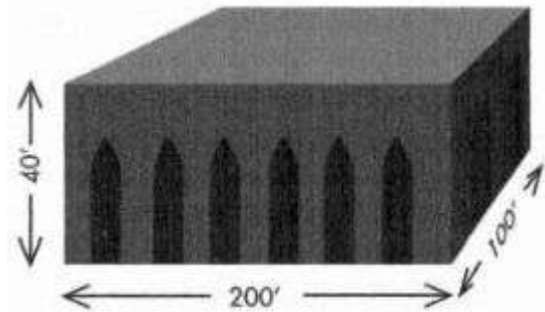
⁴⁰ Estas dimensiones son crudas conjeturas basadas en el tamaño de la edición de tapas duras de mi libro anterior. Sin duda las dimensiones reales de este libro son algo diferentes.

El teclado de mi ordenador tiene unos 100 símbolos, incluidas letras mayúsculas y minúsculas, números y signos de puntuación. Eso significa que el número de mensajes distintos que podrían contenerse en este libro es aproximadamente 100 multiplicado por sí mismo un millón de veces; en otras palabras, 100 elevado a la potencia un millón. Esta cantidad, un número inmenso, es aproximadamente la misma que multiplicar 2 por sí mismo unas 7 millones de veces. El libro contiene unos 7 millones de bits de información. En otras palabras, si yo hubiera escrito el libro en código Morse, habría tenido 7 millones de puntos y rayas. Dividiendo eso por el volumen del libro, encontramos que hay unos 6200 bits por centímetro cúbico. Esa es la densidad de información en este volumen de páginas impresas.

Una vez leí que la gran biblioteca de Alejandría contenía un billón de bits de información antes de quedar reducida a cenizas. Aunque no se consideraba una de las Siete Maravillas del Mundo, la biblioteca era en cualquier caso una de las grandes maravillas de la antigüedad. Construida durante el reinado de Ptolomeo II, se dice que contenía un ejemplar de cada documento importante escrito, en forma de medio millón de rollos de pergamino. Nadie sabe quién la quemó, pero podemos estar seguros de que una gran cantidad de información inapreciable acabó reducida a humo. ¿Cuánta? Yo calculo que habría unas cincuenta páginas modernas en un rollo antiguo. Si esas páginas se parecieran a las páginas que usted está leyendo, un rollo equivaldría a un millón de bits, con un margen de error de unos cien mil. A esa razón, la biblioteca de Ptolomeo habría

contenido medio billón (1 billón = 10^{12}) de bits, que está bastante próximo a lo que yo leí.

La pérdida de dicha información es una de las grandes desgracias con las que los estudiosos del mundo antiguo tienen que convivir. Pero podría haber sido peor. ¿Qué pasaría si cada recoveco, cada



decímetro cúbico disponible, hubiera estado lleno de libros como éste? Yo no sé exactamente qué tamaño tenía la biblioteca pero digamos que fuera $60 \times 30 \times 15$ metros, o 27 000 metros cúbicos, más o menos el tamaño de un edificio público actual. Eso son 2700 millones de centímetros cúbicos.

Con ese conocimiento, es fácil estimar cuántos bits podían estar almacenados en el edificio. A 6200 bits por centímetro cuadrado, el total es de $1,7 \times 10^{14}$. Tremendo.

Pero ¿por qué limitamos a libros? Si cada libro se contrajera a una décima parte de su volumen, podrían acumularse diez veces más bits. Transferir los contenidos a microfichas permitiría un almacenamiento aún mayor. Y digitalizar cada libro aún permitiría más.

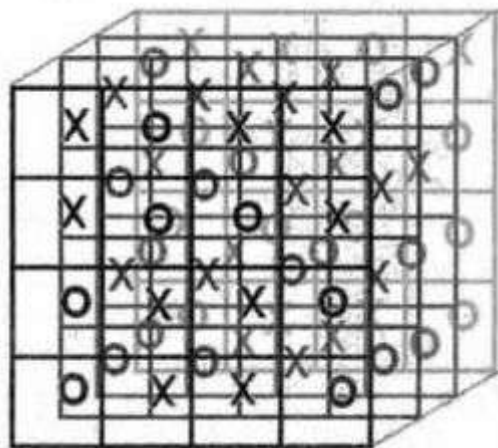
¿Hay una limitación física fundamental para la cantidad de espacio necesario para contener un solo bit? ¿Debe el tamaño físico de un bit de datos real ser mayor que un átomo, un núcleo o un quark? ¿Podemos subdividir indefinidamente el espacio y llenarlo con interminables cantidades de información? ¿O hay un límite; no un

límite tecnológico en la práctica, sino una consecuencia de una ley profunda de la Naturaleza?

El bit más pequeño

Menor que un átomo, menor que un núcleo, menor incluso que un neutrino, el simple bit quizá sea el bloque constituyente más fundamental. Carente de estructura, el bit simplemente existe o no existe. John Wheeler creía que todos los objetos materiales están compuestos de bits de información y expresó la idea en este eslogan: «It from bit».

John imaginaba que, siendo el objeto más básico, un bit es tan pequeño como el más pequeño tamaño posible: el cuanto fundamental de distancia descubierto por Planck hace más de un siglo. Una imagen muy simple que muchos físicos tienen en mente es que el espacio puede dividirse en celdas minúsculas del tamaño de Planck, como si fuera un tablero de ajedrez tridimensional. En cada celda puede almacenarse un bit de información. El bit puede ser imaginado como una partícula muy simple. Cada celda puede contener o no una partícula. Otra manera de considerar las celdas es que forman un enorme juego de tres en raya tridimensional.



Según la filosofía «It from bit» de Wheeler, las condiciones físicas del mundo en cualquier instante dado pueden representarse por un

«mensaje» semejante. Si supiéramos como leer el código, sabríamos exactamente qué estaba pasando en ese elemento de espacio. Por ejemplo, ¿es lo que normalmente llamamos espacio vacío, o es un trozo de hierro, o el interior de un núcleo?

Puesto que las cosas en el mundo cambian con el tiempo —los planetas se mueven, las partículas se desintegran, las personas nacen y mueren— el mensaje en las Os y las Xs también deben cambiar. En un instante, la pauta podría parecerse a la figura de arriba. Un poco más tarde, podría reordenarse.

En este mundo Wheeler de información, las leyes de la física consistirían en reglas para actualizar las configuraciones de un instante al siguiente. Tales reglas, si se construyen correctamente, permitirían que ondas de Os y Xs se propaguen a lo largo de las celdas de la red y representen ondas de luz. Una gran masa sólida de Os podría perturbar la distribución de Xs y Os en su vecindad, y de esta manera podría representarse el campo gravitatorio de una masa pesada.

Volvamos ahora a la pregunta de cuánta información podría almacenarse en la biblioteca de Alejandría. Todo lo que tenemos que hacer es dividir el volumen de la biblioteca —2700 millones de centímetros cúbicos— en celdas del tamaño de Planck. La respuesta es de aproximadamente 10^{109} bits.

Eso son muchos bits: muchos más que los que contiene Internet o todos los libros, discos duros y CD en todo el mundo; en realidad, inmensamente más. Para hacerse una idea de cuánta información es 10^{109} bits, imaginemos cuántos libros ordinarios se necesitarían

para almacenarlos. La respuesta es mucho más de lo que podríamos encajar en todo el universo observable.

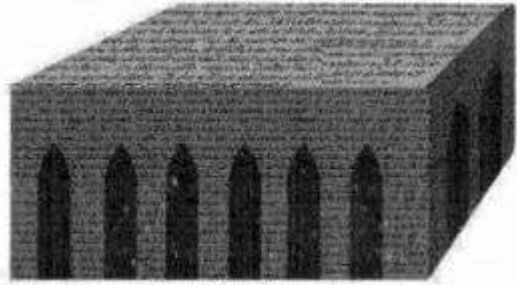
La filosofía «It from bit», que describe un mundo «celular» lleno de bits de información del tamaño de Planck, es atractiva. Ha influido en los físicos a muchos niveles. Richard Feynman era un gran defensor de la misma. Dedicó mucho tiempo a construir mundos simplificados hechos de bits que llenaban el espacio. Pero es falsa. Como veremos, Ptolomeo habría quedado decepcionado al saber que su gran biblioteca no podría haber soportado más de unos simples 10^{74} bits⁴¹.

Yo puedo imaginar más o menos lo que significa un millón: un cubo de un centímetro de lado contiene un millón de gotitas. Pero ¿qué pasa con mil millones o un billón? Es más difícil visualizar la diferencia, incluso si un billón es mil veces más grande que mil millones. Y números como 10^{74} y 10^{109} son demasiado grandes para comprenderlos, salvo para decir que 10^{109} es muchísimo mayor que 10^{74} . De hecho, 10^{74} —el número real de bits que podrían encajar en la biblioteca de Alejandría— es una fracción infinitesimal de los 10^{109} bits que calculamos. ¿Por qué hay una discrepancia tan enorme? Esa es una historia para un capítulo posterior, pero le daré aquí una pista.

Miedos y paranoias entre reyes y príncipes son un tema recurrente en la historia. Yo no sé si Ptolomeo los padecía, pero imaginemos cómo podría haber respondido al rumor de que sus enemigos

⁴¹ Resulta que ése es aproximadamente el número de bits que podrían contenerse en un universo lleno de libros impresos.

estaban ocultando información secreta en su biblioteca. Podría haberse sentido justificado para aprobar una ley draconiana que prohibiera cualquier información



oculta. En el caso de la biblioteca de Alejandría, la ley imaginaria de Ptolomeo requeriría que todo bit de información fuera visible desde el exterior del edificio. Para cumplir esta ley, toda la información tendría que estar escrita en los muros exteriores de la biblioteca. Estaría prohibido que la biblioteca ocultara un solo bit en su interior. Estarían permitidos los jeroglíficos en los muros exteriores, o las inscripciones griegas y romanas en las paredes. Pero estarían prohibidos los rollos en el interior. ¡Qué desperdicio de espacio! Pero era la ley. En estas circunstancias, ¿cuál es el máximo número de bits que Ptolomeo podría almacenar en su biblioteca?

Para encontrar la respuesta, Ptolomeo haría que sus sirvientes midieran cuidadosamente las dimensiones externas del edificio y calcularan el área de los muros exteriores y del tejado (ignoremos las arcadas y el suelo). Ellos llegarían a $(60 \times 15) + (60 \times 15) + (30 \times 15) + (30 \times 15) + (60 \times 30)$, que es igual a 4500 metros cuadrados. Note que esta vez la unidad es un metro *cuadrado* en lugar de un metro *cúbico*.

Pero el rey quería el área medida en unidades de Planck y no en metros cuadrados. Yo lo haré por usted. El número de bits que podrían cubrir los muros y el techo era de aproximadamente 10^{74} .

Uno de los descubrimientos más sorprendentes y trascendentales de la física moderna es que en el mundo real no hay necesidad de una ley de Ptolomeo. La Naturaleza ya nos proporciona dicha ley, y ni siquiera los reyes pueden violarla. Es una de las leyes de la Naturaleza más profunda que hemos descubierto. La máxima cantidad de información que puede almacenarse en una región del espacio es igual al área de la región, no al volumen. Esta extraña restricción en el llenado del espacio con información es el tema del capítulo 18.

Entropía y calor

El calor es la energía del movimiento aleatorio y caótico, y la entropía es la cantidad de información microscópica oculta. Consideremos la bañera con agua, ahora enfriada a la mínima temperatura posible —el cero absoluto— punto en que cada molécula está fijada en su localización precisa en un cristal de hielo. Hay muy poca ambigüedad en la localización de cada molécula. De hecho, cualquiera que conozca la teoría de los cristales de hielo podría decir exactamente dónde está cada átomo, incluso sin un microscopio. No hay información oculta. La energía, la temperatura y la entropía son cero.

Añadamos ahora un poco de calor calentando el hielo. Las moléculas empiezan a agitarse, pero sólo un poco. Se pierde una pequeña cantidad de información; perdemos la pista, aunque sólo un poco, de los detalles. El número de configuraciones que podríamos confundir erróneamente con otras es mayor de lo que

era. Así, un poco de calor aumenta la entropía, y eso empeora a medida que se añade más energía. El cristal se acerca al punto de fusión, y las moléculas empiezan a deslizarse unas sobre otras. Rápidamente se hace prohibitivo seguir la pista de los detalles. En otras palabras, cuando la energía aumenta, también lo hace la entropía.

Energía y entropía no son lo mismo. La energía toma muchas formas, pero una de dichas formas, el calor, se articula con la entropía.

Más sobre la segunda ley

La primera ley de la termodinámica es la ley de conservación de la energía: no se puede crear energía; no se puede destruir; todo lo que se puede hacer es cambiar su forma. La segunda ley es todavía más desalentadora: la ignorancia aumenta siempre.

Imagine una escena en la que un saltador se lanza a una piscina desde un trampolín:

energía potencial → energía cinética → calor

Rápidamente llega al reposo, y la energía potencial original se convierte en un ligero aumento de la energía térmica (calor) del agua. Con ese ligero aumento hay un ligero incremento en la entropía.

Al saltador le gustaría repetir la actuación, pero es perezoso y no quiere subir la escalera de nuevo hasta el trampolín. Él sabe que la

energía nunca puede desaparecer, de modo que ¿por qué no esperar simplemente a que parte del calor en la piscina se convierta de nuevo en energía potencial, *su* energía potencial? Nada en la conservación de la energía impediría que salga lanzado hasta el trampolín mientras la piscina se enfría un poco: el salto al revés. No sólo él llegaría al trampolín sino que la entropía de la piscina disminuiría, lo que implica una sorprendente disminución de la ignorancia.

Por desgracia, nuestro amigo mojado sólo acabó la mitad de su curso de termodinámica, la primera mitad. En la segunda mitad habría aprendido lo que todos sabemos: la entropía siempre aumenta. La energía siempre se degrada. El cambio de energía potencial, cinética, química y otras formas de energía en calor siempre va a favor de más calor y menos de esas formas de energía organizadas y no caóticas. Ésta es la segunda ley: la entropía total del mundo aumenta siempre.

Por esta razón es por la que un automóvil llegará a detenerse cuando se accionan los frenos, pero accionar los frenos en un automóvil en reposo no lo pondrá en movimiento. El calor aleatorio del suelo y del aire no puede convertirse en la energía cinética más organizada de un vehículo en movimiento. Es también la razón de que el calor del mar no pueda aprovecharse para resolver los problemas energéticos del mundo. En conjunto, la energía organizada se degrada en calor, y no al revés.

Calor, entropía, información... ¿qué tienen que ver estos conceptos prácticos y utilitarios con los agujeros negros y los fundamentos de

la física? La respuesta es todo. En el próximo capítulo veremos que los agujeros negros son fundamentalmente reservorios de información oculta. De hecho, son los contenedores de información más densamente empaquetada en la Naturaleza. Y esa puede ser la mejor definición de un agujero negro. Descubramos cómo Jacob Bekenstein y Stephen Hawking llegaron a darse cuenta de este hecho capital.

Capítulo 8

Los chicos de Wheeler, o ¿cuánta información se puede acumular en un agujero negro?

En 1972, mientras yo estaba hablando con Richard Feynman en el West End Café, un graduado de Princeton llamado Jacob Bekenstein se estaba planteando esta pregunta: ¿qué tienen que ver el calor, la entropía y la información con los agujeros negros? En esa época Princeton era el centro del mundo para el estudio de la física gravitatoria. Quizá eso tuviera algo que ver con el hecho de que Einstein había vivido allí durante más de dos décadas, aunque en 1972 hacía ya 17 años que había muerto. El profesor de Princeton que había animado a muchos estudiantes jóvenes y brillantes a estudiar la gravedad y pensar en los agujeros negros era John Archibald Wheeler, uno de los grandes visionarios de la física moderna. Entre los muchos físicos famosos que recibieron una profunda influencia de Wheeler durante este período estaban Charles Misner, Kip Thorne, Claudio Teitelboim y Jacob Bekenstein. Wheeler, que antes había sido el tutor de doctorado de Feynman, era un discípulo de Einstein. Como éste, él creía que la clave para las leyes de la Naturaleza estaba en la teoría de la gravedad. Pero a diferencia de Einstein, Wheeler, quien había trabajado con Niels Bohr, era también creyente de la mecánica cuántica. Por ello, Princeton era un centro de investigación no sólo en gravedad sino también en gravedad cuántica.

En esa época, la teoría de la gravedad era un remanso relativamente poco conocido de la física teórica. Los físicos de partículas elementales estaban dando pasos de gigante en la marcha reduccionista hacia estructuras cada vez más minúsculas. Hacía tiempo que los átomos habían dado paso a los núcleos, y los núcleos a los quarks. Los neutrinos estaban encontrando su papel preciso como socios de los electrones, y se habían conjeturado nuevas partículas tales como el quark con encanto que se descubrirían experimentalmente en menos de un año o dos. Se estaba dominando la radioactividad de los núcleos, y estaba a punto de ser formulado el modelo estándar de la física de partículas. Los físicos de partículas elementales, yo mismo incluido, pensaban que había cosas mejores que hacer que perder el tiempo con la gravedad. Había excepciones, tales como Steven Weinberg, pero la mayoría consideraban que el tema era frívolo.

Visto en retrospectiva, este desdén por la gravedad era una visión muy miope. ¿Cuál era la razón de que los agresivos líderes de la física —los atrevidos exploradores de la disciplina— no tuvieran mucha curiosidad por la gravedad? La respuesta es que no podían ver qué importancia pudiera tener la gravedad en el modo de interacción de las partículas elementales. Imaginemos que tuviéramos un interruptor que nos permitiera desconectar la fuerza eléctrica entre los núcleos atómicos y los electrones, dejando así que sólo la atracción gravitatoria mantuviese a los electrones en órbita. ¿Qué le sucedería al átomo cuando accionásemos el interruptor? El átomo se expandiría inmediatamente porque la fuerza que le

mantenía unido habría disminuido. ¿Cuál llegaría a ser el tamaño de un átomo típico? ¡Mucho mayor que el de todo el universo observable!

¿Y qué sucedería si dejáramos la fuerza eléctrica activada pero desconectásemos la gravedad? La Tierra saldría despedida lejos del Sol, pero el cambio en un átomo individual sería demasiado pequeño para notar la diferencia. Cuantitativamente, la fuerza gravitatoria entre dos electrones en un átomo es aproximadamente un millón de trillones de trillones de veces más débil que las fuerzas eléctricas.

Ése era el ambiente intelectual cuando John Wheeler se puso a explorar atrevidamente el océano de ignorancia que separaba el mundo convencional de las partículas elementales de la teoría de la gravedad de Einstein. El propio Wheeler era un enigma ambulante. Su aspecto era el de un hombre de negocios impecablemente trajeado. Fácilmente podría haber encajado en los consejos de administración de las corporaciones más conservadoras de Norteamérica. La guerra fría estaba lejos de terminar, y John era un ferviente anticomunista. Y pese a todo, durante los años sesenta y setenta, en una época de activismo sin precedentes en los campus universitarios, era profundamente querido por sus estudiantes. Claudio Teitelboim, quien hoy día es el más eminente físico latinoamericano, era uno de los estudiantes de John⁴². Claudio,

⁴² La vida de Claudio ha estado llena de sucesos espectaculares. Uno de sus trances más emotivos tuvo lugar hace dos años, cuando descubrió que su padre era Alvaro Bunster, el patriarca de una heroica familia antifascista. Como decía un titular de un destacado periódico chileno, «Famoso físico chileno que buscaba el origen del universo descubre su propio origen». Como resultado, Claudio cambió su apellido por Bunster.

descendiente de una famosa familia chilena de izquierdas, era uno de los muchos discípulos de John que se haría famoso más tarde. Su familia estaba aliada políticamente con Salvador Allende; el propio Claudio era un declarado enemigo del régimen dictatorial de Pinochet. Pero pese a sus diferencias políticas, John y Claudio mantenían una extraordinaria amistad basada en el amor y el respeto mutuo por las opiniones del otro.

Conocí a Wheeler en 1961. Yo era un estudiante en el City College de Nueva York, con un expediente académico no muy ortodoxo. Uno de mis instructores, Harry Soodak —un profesor malhablado y mascador de tabaco, del mismo estrato, trabajador, judío y de ala izquierda, del que yo procedía— me llevó a Princeton para conocerle. Tenía la esperanza de que Wheeler quedara impresionado y yo fuera admitido como estudiante de doctorado, pese a que no tenía el grado. En esa época yo estaba trabajando como fontanero en el sur del Bronx, y mi madre pensaba que debía ir vestido de forma adecuada para el encuentro. Para mi madre eso significaba que debería mostrar solidaridad con mi clase social y llevar mi ropa de trabajo. Hoy día, los fontaneros en Palo Alto visten igual que yo cuando doy clases en la Universidad de Stanford, pero en 1961 mi uniforme de fontanero era el mismo que el de mi padre y el de todos sus colegas fontaneros del Bronx: batas Li'l Abner, una camisa de trabajo de franela azul y pesadas botas con refuerzos de acero. También llevaba una capucha para proteger el pelo de la suciedad. Cuando Harry me recogió para llevarme en su coche a Princeton tuvo una doble reacción: el puro se le cayó de la boca y me dijo que

subiera de nuevo y me cambiara. Dijo que John Wheeler no era de ese tipo.

Cuando entré en el despacho del gran profesor vi lo que Harry quería decir. La única forma en que puedo describir al hombre que me recibía es decir que parecía republicano. ¿Qué demonios estaba haciendo yo en este nido de WASP^{iv} de una universidad?

Dos horas más tarde, yo estaba completamente fascinado. John estaba describiendo con entusiasmo su visión de cómo el espacio y el tiempo se convertirían en un mundo espumoso, salvaje y agitado de fluctuaciones cuánticas cuando se vieran a través de un microscopio muy potente. Me dijo que el problema más profundo y excitante de la física era unificar las dos grandes teorías de Einstein, la relatividad general y la mecánica cuántica. Explicaba que las partículas elementales sólo revelarían su verdadera naturaleza a la distancia de Planck, y todo sería geometría — geometría cuántica. Para un joven aspirante a físico, el aparente hombre de negocios se había transformado en un visionario idealista. Mi mayor deseo era seguir a este hombre en la batalla.

¿Era John Wheeler realmente tan conservador como aparentaba? Realmente no lo sé. Pero ciertamente no era un moralista mojigato. En cierta ocasión, mientras John, mi mujer, Anne, y yo estábamos tomando una copa en un café al lado de la playa de Valparaíso, él se levantó para dar un paseo, diciendo qué quería examinar a las chicas sudamericanas en bikini. Para entonces era casi nonagenario.

En cualquier caso, nunca llegué a ser uno de los chicos de Wheeler; Princeton no me admitió. Por eso fui a Cornell donde la física estaba más domesticada. Pasarían muchos años antes de que sintiera el mismo estremecimiento que tuve en 1961.

En algún momento de 1967, Wheeler se interesó mucho por los objetos producto de colapsos gravitatorios que Karl Schwarzschild había descrito en 1917. En esa época se denominaban estrellas negras o estrellas oscuras, pero eso no captaba la esencia de tales objetos, el hecho de que son agujeros profundos en el espacio cuya atracción gravitatoria es irresistible. Wheeler empezó a llamarles agujeros negros. Al principio el nombre fue rechazado por la destacada revista de física norteamericana *Physical Review*. Hoy la razón parece ridícula: ¡el término *agujero negro* se consideraba obsceno! Pero John luchó contra el consejo editorial, y así nacieron los agujeros negros⁴³.

Resulta divertido que la siguiente frase acuñada por Wheeler fue «Los agujeros negros no tienen pelo». No sé si *Physical Review* se sintió de nuevo escandalizada, pero la terminología cuajó. Wheeler no quería provocar a los editores de la revista. Más bien, estaba haciendo una afirmación muy seria sobre las propiedades de los horizontes de los agujeros negros. Lo que él entendía por «pelo» eran rasgos observables, quizá protuberancias u otras irregularidades. Wheeler estaba señalando que el horizonte de un agujero negro era tan suave y uniforme como la calva más lisa; en realidad, mucho más suave. Cuando se formaba un agujero negro —por ejemplo, por

⁴³ Oí esta historia por primera vez de labios del relativista Werner Israel.

el colapso de una estrella— el horizonte se asentaba rápidamente como una esfera uniforme y perfectamente regular. Aparte de su masa y velocidad de rotación, cada agujero negro era exactamente igual que los demás. O eso es lo que se pensaba.

Jacob Bekenstein, un israelí, es un hombre pequeño y tranquilo. Pero su apariencia amable y erudita no le hace justicia a su atrevimiento intelectual. En 1972 era uno de los estudiantes de doctorado de Wheeler interesados en los agujeros negros. Pero él no estaba interesado en estos objetos como cuerpos astronómicos que pudieran llegar a verse algún día a través de telescopios. La pasión de Bekenstein eran los fundamentos de la física —los principios básicos subyacentes— y tenía la sensación de que los agujeros negros tenían algo profundo que decir sobre las leyes de la Naturaleza. Estaba particularmente interesado en cómo podrían encajar los agujeros negros en los principios de la mecánica cuántica y de la termodinámica que tanto habían preocupado a Einstein. De hecho, el estilo de Bekenstein de hacer física era muy parecido al de Einstein; ambos eran maestros del experimento mental. Con muy pocas matemáticas, pero con mucha reflexión profunda sobre los principios de la física y cómo se aplican a circunstancias físicas imaginarias (pero posibles), ambos fueron capaces de extraer conclusiones de gran alcance que iban a afectar profundamente al futuro de la física.

Ésta es, en pocas palabras, la pregunta de Bekenstein. Imagine que usted está en órbita en torno a un agujero negro. Tiene un recipiente con gas caliente; gas con mucha entropía. Usted arroja el

recipiente de entropía al agujero negro. Según el saber establecido, el recipiente simplemente desaparecería detrás del horizonte. Para cualquier fin práctico, esa entropía desaparecería por completo del universo observable. Según la visión dominante, el horizonte liso y uniforme no podría ocultar ninguna información. Por lo tanto, parecería que la entropía del mundo había disminuido, en contradicción con la segunda ley de la termodinámica, que dice que la entropía nunca decrece. ¿Podría ser tan fácil violar un principio tan profundo como la segunda ley? Einstein se habría sentido horrorizado.

Bekenstein concluyó que la segunda ley está demasiado profundamente enraizada en las reglas de la física para que pueda ser violada tan fácilmente. En su lugar, él hizo una propuesta nueva y radical: los propios agujeros negros deben tener entropía. Argumentó que cuando se hace la cuenta de toda la entropía del universo —la información ausente en las estrellas, el gas interestelar, la atmósfera de los planetas, y todas las bañeras con agua caliente— hay que incluir cierta cantidad de entropía por cada agujero negro. Además, cuanto más grande es el agujero negro, mayor es su entropía. Con esa idea, Bekenstein podía salvar la segunda ley. Sin duda Einstein lo hubiese aprobado.

Así es como lo consideraba Bekenstein. La entropía va siempre unida a la energía. La entropía tiene que ver con el número de configuraciones de algo, y ese algo, en todos los casos, tiene energía. Incluso la tinta de una página está hecha de átomos con masa, que, según Einstein, tienen energía, porque la masa es una forma de

energía. Se podría decir que la entropía cuenta las posibles maneras de ordenar fragmentos de energía.

Cuando Bekenstein, en su imaginación, arrojaba un recipiente con gas al agujero negro, estaba aumentando la energía del agujero negro. Esto significaba, a su vez, un aumento en la masa y el tamaño del agujero negro. Si, como conjeturaba Bekenstein, los agujeros negros tienen entropía, que aumenta con su masa, hay una oportunidad de salvar la segunda ley. La entropía del agujero negro aumentaría más que suficiente para compensar la que se perdía.

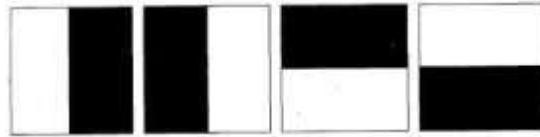
Antes de explicar cómo conjeturó Bekenstein la fórmula para la entropía del agujero negro, explicaré por qué era una idea tan chocante —tan chocante que, según Stephen Hawking, él inicialmente la descartó como algo sin sentido⁴⁴.

La entropía cuenta configuraciones alternativas, pero ¿configuraciones de qué? Si el horizonte de un agujero negro es tan uniforme como la calva más lisa concebible, ¿qué hay para contar? Según esta lógica, un agujero negro debería tener entropía cero. La afirmación de John Wheeler de que «los agujeros negros no tienen pelo» parecía contradecir directamente la teoría de Jacob Bekenstein.

¿Cómo reconciliar a maestro con estudiante? Déjeme darle un ejemplo que le ayudará a entenderlo. La impresión de una página ilustrada con varios tonos de gris está realmente compuesta de minúsculos puntos negros y blancos. Supongamos que tenemos un

⁴⁴ Puede usted leer sobre su escepticismo inicial en su libro *Una historia del tiempo*.

millón de puntos negros y un millón de puntos blancos con los que trabajar. Una pauta posible sería dividir la página por la mitad, en vertical o en horizontal. Podemos hacer una mitad negra y la otra mitad blanca. Sólo hay cuatro maneras de hacerlo.

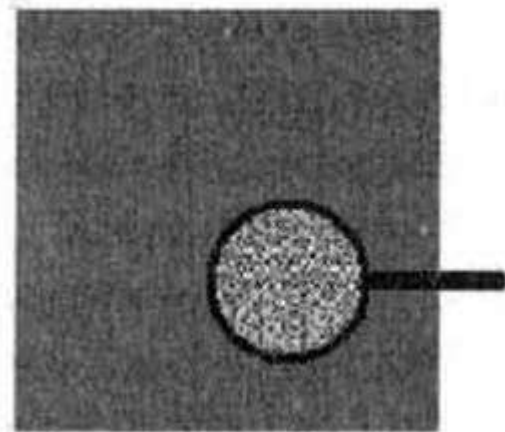


Vemos una pauta clara con diferencias bien definidas, pero muy pocas configuraciones. Pautas claras y diferencias definidas significan normalmente poca entropía.

Pero vayamos ahora al otro extremo y distribuyamos al azar el mismo número de píxeles negros y blancos sobre el mismo cuadrado. Lo que vemos es un gris más o menos uniforme. Si los píxeles son realmente pequeños, el gris parecerá muy uniforme. Hay un número enorme de maneras de reordenar los puntos negros y blancos que no advertiríamos sin una lente de aumento.

En este caso, vemos que una gran entropía suele estar asociada a una apariencia de «calva» uniforme.

La combinación de uniformidad aparente y gran entropía indica algo importante. Implica que el sistema, cualquiera que sea, debe estar hecho de un número muy grande de objetos microscópicos que a)



son demasiado pequeños para verse y b) pueden reordenarse de muchas maneras sin cambiar la apariencia básica del sistema.

Cómo calculó Bekenstein la entropía de un agujero negro

La observación de Bekenstein de que los agujeros negros deben tener entropía —en otras palabras, que pese a su aparente uniformidad, mantienen información oculta— es una de esas observaciones simples pero profundas que, de golpe, cambian el curso de la física. Cuando empecé a escribir libros para el gran público se me aconsejó insistentemente que redujera las ecuaciones a sólo una: $E = mc^2$. Se me informó que por cada ecuación adicional que incluyera, vendería 10 000 libras menos. Francamente, no es esa mi experiencia. A la gente le gusta que le desafíen; lo que no les gusta es que les aburra. Así que, después de mucho meditarlo, decidí correr el riesgo. El argumento de Bekenstein es de una simplicidad y una belleza tan extraordinarias que creo que no incluirlo en este libro sería una lamentable ocultación del material. No obstante, me he esforzado en explicar los resultados de modo que el lector con menos inclinación matemática pueda saltarse las pocas ecuaciones sin perder la esencia.

Bekenstein no preguntó directamente cuántos bits podían estar ocultos dentro de un agujero negro de un tamaño dado. En su lugar, él preguntó cómo cambiaría el tamaño de un agujero negro si se dejase caer en él un solo bit de información. Esto es como preguntar cuánto aumentará el agua en una bañera si se añade una

sola gota de agua. Aún mejor, ¿cuánto aumentará el agua si se añade un solo átomo?

Eso planteaba otra pregunta: ¿cómo añadir un solo bit? ¿Debería Bekenstein arrojar un simple punto, impreso en un trozo de papel? Obviamente no; ese punto está compuesto de un enorme número de átomos, y también lo está el papel. Hay mucha más información en dicho punto que un bit. La mejor estrategia sería arrojar una partícula elemental.

Supongamos, por ejemplo, que cae un fotón en un agujero negro. Incluso un fotón puede llevar más de un bit de información. En particular, hay mucha información en conocer exactamente por dónde entra el fotón en el horizonte. Aquí Bekenstein hizo un uso ingenioso del concepto de *incertidumbre* de Heisenberg. Argumentó que la localización del fotón debería ser tan incierta como fuera posible, con tal de que entrara en el agujero negro. La existencia de semejante «fotón incierto» llevaría sólo un bit de información, a saber: está ahí, en alguna parte del agujero negro.

Recordemos del capítulo 4 que el poder de resolución de un rayo luminoso no es mejor que su longitud de onda. En este caso particular, Bekenstein no quería resolver un punto en el horizonte; él quería que fuera lo más difuminado posible. El truco era utilizar un fotón de longitud de onda tan larga que estuviera disperso sobre todo el horizonte. En otras palabras, si el horizonte tiene radio de Schwarzschild R_S , el fotón debería tener aproximadamente la misma longitud de onda. Incluso longitudes de onda mayores podrían

parecer una opción, pero éstas tan sólo rebotarían en el agujero negro sin quedar atrapadas.

Bekenstein sospechaba que un bit extra añadido al agujero negro le haría crecer con un incremento minúsculo, algo parecido a como aumentaría el tamaño de un globo si se le añadiera una molécula de caucho extra. Pero calcular el crecimiento requería algunos pasos intermedios. Déjeme exponer primero las líneas generales.

1. Para empezar, necesitamos saber cuánto aumenta la energía del agujero negro cuando añadimos un solo bit de información. Esa cantidad, de hecho, es la energía del fotón que porta el bit. Por ello, el primer paso es determinar la energía del fotón.
2. A continuación, necesitamos determinar cuánto cambia la masa del agujero negro cuando se añade el bit extra. Para hacerlo, recordemos la ecuación más famosa de Einstein:

$$E = mc^2.$$

Pero la leemos hacia atrás. Nos dice el cambio en masa en términos de la energía añadida.

3. Una vez que se conoce el cambio en masa podemos calcular el cambio en el radio de Schwarzschild, utilizando la misma fórmula que dedujeron Michell, Laplace y Schwarzschild (véase capítulo 2):

$$R_s = 2GM/c^2.$$

4. Finalmente, debemos determinar el aumento del área del horizonte. Para ello necesitamos la fórmula para el área de una esfera:

$$\text{Área del horizonte} = 4\pi R_s^2.$$

Empezamos con la energía de un fotón de un bit. Como ya he explicado, el fotón debería tener una longitud de onda suficientemente grande para que su posición sea incierta dentro del agujero negro. Eso significa que la longitud de onda debería ser R_S . Según Einstein, un fotón de longitud de onda R_S tiene una energía, E , dada por la siguiente fórmula⁴⁵:

$$E = hc/R_S$$

En esta fórmula, h es la constante de Planck, y c es la velocidad de la luz. La consecuencia es que dejar caer un solo bit de información en el agujero negro incrementará su energía en una cantidad hc/R_S . El siguiente paso es calcular cuánto cambia la masa del agujero negro. Para convertir energía en masa hay que dividir por c^2 , lo que significa que la masa del agujero negro aumentará en una cantidad $h/R_S c$.

$$\text{Cambio en masa} = h/R_S c.$$

Introduzcamos algunos números para ver cuánto añadiría un solo bit a la masa de un agujero negro de masa solar.

- constante de Planck = $6,626068 \times 10^{-34}$ m² kg/s.
- Radio de Schwarzschild del agujero negro, $R_S = 3000$ metros

⁴⁵ La frecuencia, f , del fotón con longitud de onda R_S es c/R_S . Utilizando la fórmula de Einstein-Planck $E=hf$ obtenemos que la energía del fotón es hc/R_S .

- Velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8$
- G (constante de Newton) = $6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$.

Así pues, un bit de información añadido a un agujero negro de masa solar añadiría una cantidad de masa increíblemente pequeña:

$$\text{Incremento de masa} = 10^{-45} \text{ kilogramos.}$$

Pero, como se suele decir, «menos es nada».

Pasemos al paso tres: utilizar la relación entre masa y radio para calcular el cambio en R_s . En símbolos algebraicos la respuesta es como sigue:

$$\text{Incremento en } R_s = 2hG/(R_s c^2).$$

Para el agujero negro de masa solar, R_s es de unos 3000 metros. Si introducimos los números, encontraremos que el radio aumenta en 10^{-72} metros. Esto no sólo es inmensamente menor que un protón, sino que también es inmensamente menor que la longitud de Planck (10^{-35} metros). Con un cambio tan pequeño, usted podría preguntarse por qué nos molestamos siquiera en calcularlo, pero sería un error ignorarlo.

El paso final es calcular cuánto cambiará el área del horizonte. Para el agujero negro de masa solar, el aumento en el área del horizonte es unos 10^{-70} metros cuadrados. Eso es muy pequeño, pero de nuevo, «menos es nada». Y no sólo menos es nada, sino que es algo

muy especial: resulta que 10^{-70} metros cuadrados es una *unidad de Planck cuadrada*.

¿Es esto un accidente? ¿Qué sucedería si probásemos con un agujero negro de masa terrestre (un agujero negro del tamaño de una cereza) o con un agujero negro mil millones de veces más masivo que el Sol? Pruébalo, ya sea con números o con ecuaciones. Cualquiera que sea el tamaño del agujero negro original, la regla es ésta:

Añadir un bit de información aumentará el área del horizonte de cualquier agujero negro en una unidad de Planck de área, o una unidad de Planck cuadrada.

De algún modo, oculta en los principios de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad general, hay una misteriosa relación entre bits de información indivisibles y bits de área del tamaño de Planck. Cuando yo explicaba todo esto en mi clase de física para estudiantes de medicina en Stanford, alguien que estaba en el fondo del aula dejó escapar un susurro y luego dijo, «Frííííííío». Es frío, pero también es profundo y probablemente guarda la clave para el enigma de la gravedad cuántica.

Imaginemos ahora que construimos el agujero negro bit a bit, igual que podríamos llenar una bañera átomo a átomo. Cada vez que añadimos un bit de información, el área del horizonte aumenta en una unidad de Planck. Para cuando el agujero negro esté completo, el área del horizonte será igual al número total de bits de

información ocultos en el agujero negro. Ése fue el gran logro de Bekenstein, resumido en esta frase:

La entropía de un agujero negro, medida en bits, es proporcional al área de su horizonte, medida en unidades de Planck.

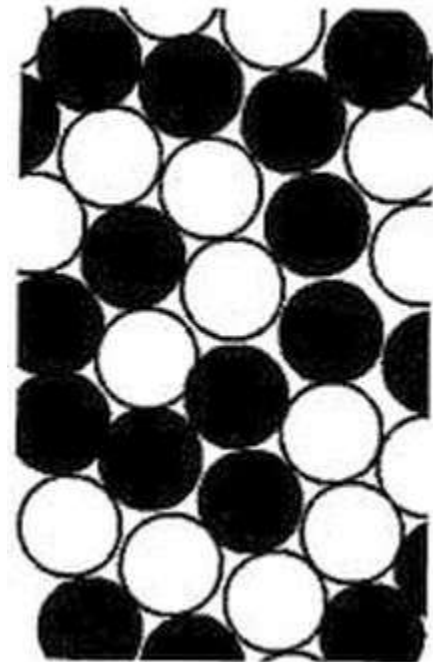
O, de forma más sucinta: *Información igual a área.*

Casi parece que el horizonte esté densamente cubierto de bits incompresibles de información, más o menos de la misma manera que un tablero de mesa puede estar densamente cubierto con monedas.

Añadir una moneda extra al montón aumentaría su área en el área de una moneda. Bits, monedas, es el mismo principio.

El único problema con esta imagen es que no hay monedas en el horizonte. Si las hubiera, Alicia las habría descubierto cuando cayó en el agujero negro. Según la teoría de la relatividad general, para la Alicia en caída libre, el horizonte es un punto de no retorno invisible. La posibilidad de que encontrara algo parecido a una mesa llena de monedas está en conflicto directo con el principio de equivalencia de Einstein.

Esta tensión —la aparente inconsistencia entre el *horizonte como una superficie, densamente forrada de bits materiales, y el horizonte*



como un mero punto de no retorno— fue el *casus belli* de la guerra de los agujeros negros.

Otra cuestión ha intrigado a los físicos desde el descubrimiento de Bekenstein: ¿por qué la entropía es proporcional al área del horizonte y no al volumen del interior del agujero negro? Parece que haya dentro un montón de espacio desperdiciado. De hecho, un agujero negro se parece mucho a la biblioteca de Ptolomeo. Volveremos a este punto en el capítulo 18, donde veremos que todo el mundo es un holograma.

Aunque Bekenstein tenía la idea correcta —la entropía del agujero negro es proporcional al área— su argumento no era totalmente preciso, y él lo sabía. Él no decía que la entropía es *igual* al área medida en unidades de Planck. Debido a varias incertidumbres en su cálculo, todo lo que podía decir era que la entropía de un agujero negro es *proporcional* al área. En física, *proporcional* es una palabra resbaladiza. ¿Es el doble del área o una cuarta parte del área? Los argumentos de Bekenstein, aunque brillantes, no eran suficientemente poderosos para fijar el factor de proporcionalidad exacto.

En el próximo capítulo veremos cómo el descubrimiento de Bekenstein de la entropía de un agujero negro llevó a Stephen Hawking a su idea más grandiosa: los agujeros negros no sólo tienen entropía, como Bekenstein supuso correctamente, sino que también tienen temperatura. No son los objetos muertos e infinitamente fríos que los físicos habían pensado que eran. Los

agujeros negros brillan con un calor interior, pero en último término dicho calor los lleva a su destrucción.

Capítulo 9

Luz negra

El viento invernal es más molesto en las grandes ciudades. Se encajona en largos corredores entre edificios de fachadas planas y azota las esquinas, sacudiendo de forma inmisericorde a los sufridos peatones. Un día muy desagradable de 1974 salí a correr por las calles heladas del norte de Manhattan, con carámbanos de sudor colgando de mi melena. Al cabo de unos veinticinco kilómetros estaba exhausto, pero aún me quedaban tres kilómetros hasta mi cálido despacho, pues no llevaba cartera y ni siquiera tenía los veinte centavos necesarios para tomar el metro de vuelta. Pero la suerte estaba conmigo. Cuando dejé la calzada en algún lugar cerca de Dyckman Street, se me acercó un automóvil, y Aage Petersen sacó la cabeza por la ventanilla. Aage era un encantador gnomo danés que había sido ayudante de Niels Bohr en Copenhague antes de venir a Estados Unidos. Amaba la mecánica cuántica y vivía y respiraba la filosofía de Bohr.

Una vez dentro del coche, Aage me preguntó si yo iba a la charla de Dennis Sciama en la Belfer School. Yo no iba. De hecho, no sabía nada de Sciama ni de su charla. En lugar de ello, estaba pensando en un plato de sopa en la cafetería de la universidad. Aage había conocido a Sciama en Inglaterra y dijo que era un inglés muy divertido de la Universidad de Cambridge con quien se podían intercambiar montones de chistes. Aage pensaba que la charla tenía algo que ver con los agujeros negros, un trabajo que había hecho un

estudiante de Sciama y que había revolucionado Cambridge. Prometí a Aage que iría.

La cafetería de la Universidad Yeshiva no era muy de mi gusto. La comida no era mala —la sopa era *kosher* (eso no me preocupaba), y estaba caliente (eso era importante)— pero las conversaciones entre los estudiantes me irritaban. Casi siempre hablaban de derecho. No de la ley federal, ni de la ley estatal, ni la de la ciudad, ni las leyes de la ciencia, sino de las pejiguerías de la ley talmúdica que interesaban a los jóvenes estudiantes de Yeshiva: «¿Sería *kosher* la Pepsi si estuviera hecha en una planta construida sobre una antigua granja de cerdos? ¿Qué pasaría si el suelo se cubriera con contrachapado antes de construir la planta?». Cosas de este tipo. Pero la sopa caliente y el tiempo frío me animaron a entrar y espiar a unos estudiantes que había en la mesa de al lado. Esta vez el tema de la conversación era uno que incluso a mí me preocupaba: ¡el papel higiénico! El acalorado debate talmúdico versaba sobre la cuestión transcendental de si los rollos de papel higiénico pueden ser repuestos durante el Sabbath o si se debe utilizar el papel de un rollo no colocado en el portarollos. De varios pasajes en los escritos del *Rabbi Akiva*, una facción había supuesto que el gran hombre había insistido en la obediencia rigurosa a ciertas leyes, que prohibían rellenar el portarollos. La otra facción creía que el incomparable Rambam⁴⁶ había dejado claro en la *Guía de perplejos* que ciertas tareas necesarias estaban exentas de estas reglas

⁴⁶ «Rambam» es el apodo de *Rabbi Moses Ben Maimon*, más conocido en el mundo no judío como Maimónides.

talmúdicas, y el análisis lógico favorecía la idea de que reponer el papel higiénico era una de esas tareas. Al cabo de media hora, la discusión todavía coleaba. Varios nuevos aspirantes a rabino se habían unido a la batalla con argumentos adicionales ingeniosos y casi matemáticos, y finalmente me cansé del debate.

Usted se estará preguntando qué tiene que ver todo esto con el tema de este libro, los agujeros negros. Sólo esto: mi estancia en la cafetería me hizo perderme los primeros cuarenta minutos de la brillante conferencia de Dennis Sciama.

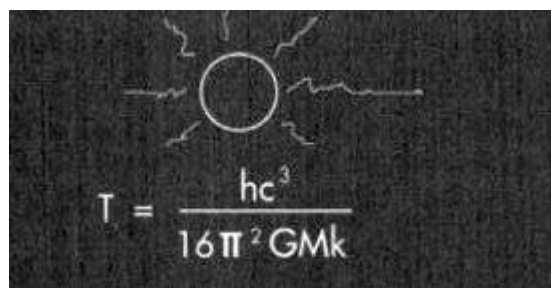
La Universidad de Cambridge, donde Sciama era profesor de astronomía y cosmología, era uno de los tres lugares (además de Princeton y Moscú)⁴⁷ donde los «más brillantes y los mejores» estaban poniendo a prueba sus intelectos frente a los profundos enigmas de la gravedad. Y como en Princeton, sus jóvenes guerreros intelectuales estaban dirigidos por un líder carismático. Los chicos de Sciama eran un grupo estelar de jóvenes y brillantes físicos, entre los que se incluían Brandon Carter, formulador del principio antrópico en cosmología; *sir* Martin Rees, el astrónomo real de Gran Bretaña, quien ahora ocupa la cátedra de *sir* Edmond Halley (el Halley de fama cometaria); Philip Candelas, el actual Rouse Ball Professor de matemáticas en Oxford; David Deutsch, uno de los inventores de la computación cuántica; John Barrow, un distinguido astrónomo de Cambridge; y George Ellis, un cosmólogo bien conocido. ¡Ah, sí!, también estaba Stephen Hawking, que ahora

⁴⁷ El gran centro de gravedad en Moscú estaba dirigido por el legendario astrofísico y cosmólogo ruso Yakov B. Zeldovich.

se sienta en la cátedra de Isaac Newton en Cambridge. De hecho, era el trabajo de Stephen lo que Dermis iba a contar ese gélido día de 1974, pero entonces el nombre de Stephen Hawking no significaba nada para mí.

Cuando llegué a la conferencia de Sciama ya habían pasado dos terceras partes. Inmediatamente lamenté no haber llegado antes. Para empezar, yo no tenía ganas de salir de nuevo a la intemperie en mi ropa de correr. Había oscurecido y sin duda haría más frío cuando Dermis concluyera. Pero era más que el temor a congelarme lo que me hacía desear que Sciama estuviera empezando. Como Aage había dicho, Dermis era un orador enormemente entretenido. Los chistes eran realmente buenos pero más importante era que yo estaba fascinado por la única ecuación que había en la pizarra.

Normalmente, cuando acaba una charla de física teórica la pizarra está llena de símbolos matemáticos. Pero Sciama era hombre de pocas ecuaciones. Cuando llegué, en la pizarra había algo así:



The image shows a chalkboard with a drawing of a sun at the top, consisting of a circle with radiating lines. Below the drawing is the mathematical formula:

$$T = \frac{hc^3}{16\pi^2 GMk}$$

En cinco minutos yo había descifrado lo que los símbolos representaban. De hecho, todos eran notación estándar para magnitudes familiares en física. Pero yo no sabía el contexto —qué es lo que describía la fórmula— aunque podía decir que o era muy

profundo o muy tonto. Sólo tenía las constantes más fundamentales de la Naturaleza: la constante de Newton, G , que gobierna la fuerza de la gravedad, estaba en el denominador, un lugar extraño para encontrarla; c , la velocidad de la luz, indicaba que estaba implicada la teoría de la relatividad especial; la constante de Planck, h , revelaba la mecánica cuántica; y luego estaba k , la constante de Boltzmann. Era la última la que parecía fuera de lugar. ¿Qué demonios hacía allí? La constante de Boltzmann tiene que ver con el calor y el origen microscópico de la entropía. ¿Qué estaban haciendo el calor y la entropía en una fórmula de gravedad cuántica?

Y ¿qué pasa con el número 16 y con π^2 ? Estos eran del tipo de números matemáticos que aparecen en todo tipo de ecuaciones. No daban ninguna pista. M era familiar, y las palabras de Sciama reforzaron mi impresión de su significado. M era masa. En un par de minutos, podía decir que era la masa de un agujero negro.

Muy bien; agujeros negros, gravedad y relatividad. Eso tenía sentido, pero añadir la mecánica cuántica parecía extraño. Los agujeros negros son enormemente masivos, tan masivos como las estrellas que les precedieron. Pero la mecánica cuántica trata de cosas pequeñas: átomos, electrones y fotones. ¿Por qué meter la mecánica cuántica en una discusión de algo tan masivo como una estrella?

Y lo más confuso, el primer miembro de la ecuación representaba la temperatura, T . ¿La temperatura de qué?

Los últimos quince o veinte minutos de la conferencia de Sciama fueron suficientes para que pudiera encajar estas piezas. Uno de los

estudiantes de Dennis había descubierto algo muy extraño: la mecánica cuántica da a los agujeros negros propiedades térmicas — calor— y junto con el calor viene la temperatura. La ecuación en la pizarra era una fórmula para la temperatura de un agujero negro.

¡Qué extraño!, pensé. ¿Qué le dio a Sciama la extraña idea de que una estrella muerta, una estrella que ha consumido por completo su combustible, tendría una temperatura distinta al cero absoluto?

Examinando la intrigante fórmula, vi una correlación interesante: la temperatura de un agujero negro sería inversamente proporcional a su masa; cuanto mayor es la masa, menor es la temperatura. Un enorme agujero negro astronómico, tan grande como una estrella, tendría una temperatura minúscula, mucho más fría que cualquier objeto en cualquier laboratorio de la Tierra. Pero la sorpresa real, que casi me hizo saltar de mi silla, era que los agujeros negros minúsculos, si existieran, eran extraordinariamente calientes —más calientes que cualquier cosa que hubiéramos imaginado.

Pero Sciama tenía una sorpresa aún mayor: ¡los agujeros negros se evaporan! Hasta entonces los físicos habían creído que los agujeros negros, como los diamantes, existían para la eternidad. Una vez formados, ningún mecanismo conocido por la ciencia física podría destruir o eliminar un agujero negro. La vacante negra en el espacio formada por una estrella muerta persistiría —infinitamente fría, infinitamente silenciosa— por toda la eternidad.

Pero Sciama nos dijo que, como una gota de agua que se deja caer en el Sol, poco a poco, los agujeros negros se evaporan y con el

tiempo desaparecen. Como él explicaba, la radiación térmica electromagnética se lleva la masa de un agujero negro.

Para explicar por qué Dennis y su estudiante pensaban así, tengo que decirle algunas cosas sobre el calor y la radiación térmica. Volveré a los agujeros negros, pero antes, una digresión.

Calor y temperatura

El calor y la temperatura están entre los conceptos más familiares en física. Todos tenemos un termómetro y un termostato incorporados. La evolución nos proporcionó una sensación del frío y el calor.

Calidez es calor, y el frío es su ausencia, pero ¿qué es exactamente esa cosa llamada calor? ¿Qué hay en una bañera de agua caliente que está ausente cuando el agua de la bañera se enfría? Si usted mira cuidadosamente a través de un microscopio pequeñas motas de polvo o granos de polen suspendidos en agua caliente, verá que los granos se mueven de un lado a otro como marineros borrachos. Cuanto más caliente está el agua, más agitados se ven los granos. Fue Albert Einstein⁴⁸ quien en 1905 explicó por primera vez que este movimiento browniano es debido a que los granos están siendo bombardeados constantemente por moléculas energéticas que se mueven rápidamente. El agua, como cualquier otro material, está

⁴⁸ En 1905, Einstein inició dos revoluciones en física y acabó una tercera. Las dos nuevas revoluciones eran, por supuesto, la teoría de la relatividad especial y la teoría cuántica (o fotónica) de la luz. El mismo año, Einstein dio la primera prueba definitiva de la teoría molecular de la materia en su artículo sobre el movimiento browniano. Físicos como James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann habían sospechado hacía tiempo que el calor era el movimiento aleatorio de hipotéticas moléculas de materia, pero fue Einstein quien fue capaz de proporcionar la prueba definitiva.

compuesta de moléculas que se mueven de un lado a otro, chocando unas con otras, contra las paredes del recipiente y contra cualquier impureza extraña. Cuando ese movimiento es aleatorio y caótico le llamamos calor. En el caso de objetos ordinarios, cuando se añade energía en forma de calor el resultado es un aumento en las energías cinéticas aleatorias de las moléculas.

La temperatura está, por supuesto, relacionada con el calor. Cuando las moléculas zigzagueantes inciden en su piel, excitan terminaciones nerviosas y usted experimenta una sensación de temperatura. Cuanto mayor es la energía de las moléculas individuales, más afectadas están sus terminaciones nerviosas y más calor siente usted. Su piel es tan sólo uno de los muchos tipos de termómetros que pueden sentir y registrar el movimiento caótico de las moléculas.

Por eso, hablando en términos generales, la temperatura de un objeto es una medida de la energía de sus moléculas individuales. Cuando un objeto se enfría se está extrayendo energía, y las moléculas se están frenando. Con el tiempo, a medida que se elimina energía las moléculas alcanzan el estado de mínima energía posible. Si pudiéramos ignorar la mecánica cuántica, esto ocurriría cuando el movimiento molecular cesara por completo. En ese instante no habría más energía que extraer, y el objeto estaría en el cero absoluto. La temperatura no puede descender por debajo de eso.

Los agujeros negros son cuerpos negros

La mayoría de los objetos reflejan al menos algo de luz. La razón de que la pintura roja sea roja es que refleja luz roja. Dicho de forma más precisa, refleja cierta combinación de longitudes de onda que el ojo y el cerebro perciben como rojo. Análogamente, la pintura azul refleja una combinación que percibimos como azul. La nieve es blanca porque la superficie de los cristales de hielo refleja todos los colores visibles por igual. (La única diferencia entre la nieve y una capa de hielo parecida a un espejo es que la estructura granular de la nieve dispersa la luz en todas direcciones y rompe la imagen reflejada en miles de fragmentos minúsculos). Pero algunas superficies casi no reflejan luz. Cualquier luz que incide en la superficie llena de hollín de un puchero ennegrecido es absorbida en la capa de hollín, y calienta el recubrimiento exterior negro y eventualmente el propio hierro. Éstos son objetos que nuestros cerebros perciben como negros.

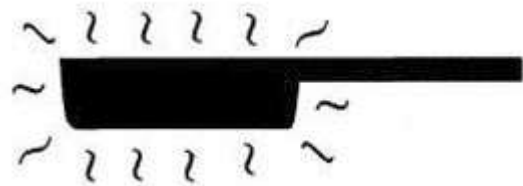
El término de los físicos para un objeto que absorbe toda la luz es *cuerpo negro*. Cuando Sciama dio su conferencia en mi universidad en Nueva York, hacía tiempo que los físicos sabían que los agujeros negros son cuerpos negros. Laplace y Michell lo habían sospechado en el siglo XVIII, y la solución de Schwarzschild de las ecuaciones de Einstein lo había demostrado. La luz que cae en el horizonte de un agujero negro es absorbida por completo. Los horizontes de los agujeros negros son lo más negro de lo negro.

Pero lo que nadie sabía antes del descubrimiento de Hawking era que los agujeros negros tienen una temperatura. Antes de eso, si

uno hubiera preguntado a un físico, «¿Cuál es la temperatura de un agujero negro?», la respuesta inicial habría sido probablemente, «Los agujeros negros no tienen temperatura». Uno podría haber respondido, «Absurdo. Todo tiene una temperatura». Una pequeña reflexión podría haber provocado la respuesta, «Muy bien, un agujero negro no tiene calor, de modo que debe estar en el cero absoluto —la mínima temperatura posible—». De hecho, antes de Hawking todos los físicos habrían afirmado que los agujeros negros eran realmente cuerpos negros, pero cuerpos negros en el cero absoluto.

Ahora bien, no es correcto decir que los cuerpos negros no dejan escapar ninguna luz. Tome un puchero con hollín y caliéntelo a unos pocos grados centígrados, y el puchero brillará con un resplandor rojo. Caliéntelo aún más, y resplandecerá anaranjado, luego amarillo y finalmente tendrá una apariencia azulada. Curiosamente, según la definición de los físicos, el Sol es un cuerpo negro. ¡Qué extraño!, dice usted; es difícil imaginar algo menos negro que el Sol. De hecho, la superficie del Sol irradia mucha luz, pero *no refleja ninguna*. Para un físico, eso le hace un agujero negro. Enfríe el puchero caliente y resplandecerá con radiación infrarroja invisible. Incluso los objetos más fríos irradian alguna radiación electromagnética siempre que no estén en el cero absoluto.

Pero la radiación emitida por los cuerpos negros no es luz reflejada; está producida por átomos que,



vibran o colisionan y, a diferencia de la luz reflejada, el color depende de la temperatura del cuerpo.

Lo que Dennis Sciama explicó era extraordinario (y parecía un poco disparatado en ese momento). Él dijo que los agujeros negros son cuerpos negros, pero no están en el cero absoluto. Cada agujero negro tiene una temperatura que depende de su masa. La fórmula estaba en la pizarra.

Él nos dijo una cosa más, en cierto sentido la más sorprendente de todas. Puesto que un agujero negro tiene calor y temperatura, debe irradiar radiación electromagnética —fotones— de la misma forma que lo hace un puchero negro caliente. Eso significa que pierde energía. Según la fórmula $E=mc^2$ de Einstein, energía y masa son realmente lo mismo. Por eso, si un agujero negro pierde energía, también pierde masa.

Eso nos lleva a la conclusión de la historia de Sciama. El tamaño de un agujero negro —el radio de su horizonte— es directamente proporcional a su masa. Si la masa decrece, se sigue que el tamaño del agujero negro decrece. Por eso, a medida que un agujero negro irradia energía, se contrae hasta que no es mayor que una partícula elemental, y entonces desaparece. Según Sciama, los agujeros negros se evaporan, como el rocío en un día de verano.

A lo largo de la charla, o al menos en la parte de la que yo fui testigo, Sciama dejó muy claro que él no era la fuente de estos descubrimientos. Era «Stephen dice esto», y «Stephen dice aquello». Pero a pesar de lo que decía Dennis, mi impresión al final de la conferencia era que el desconocido Stephen Hawking era tan sólo

un estudiante afortunado que resultó estar en el lugar correcto y en el tiempo correcto para engancharse en el proyecto de investigación de Dennis. Es normal que un físico bien conocido mencione generosamente el nombre de un estudiante brillante durante una conferencia. Ya fueran las ideas brillantes o estúpidas, yo supuse de forma natural que su origen estaba en el físico más veterano.

Esa tarde me convencieron de que esa hipótesis era falsa. Aage, algunos otros miembros del claustro de física de Belfer y yo llevamos a cenar a Dennis a un buen restaurante italiano en Little Italy. Durante la cena, Dennis nos habló de este extraordinario estudiante.

De hecho Stephen no era un estudiante en absoluto. Cuando Dennis hablaba de «su estudiante Hawking», él estaba hablando de la misma manera que el orgulloso padre de un ganador del premio Nobel podría hablar de «mi chico». En 1974 Stephen era una estrella ascendente en el mundo de la relatividad general. Él y Roger Penrose habían hecho importantes contribuciones al tema. Era mi propia ignorancia la que me había llevado a creer que Stephen era simplemente el estudiante de un director de tesis generoso.

Con comida italiana y buen vino, oí la historia sorprendente, y aun más extraordinaria que la ficción, del joven genio que había florecido sólo después de que se le diagnosticase una enfermedad degenerativa. Cuando era un estudiante de doctorado brillante pero insoportablemente egotista y superficial —uno al que Dennis describía como frecuentemente bebido y más habituado a vagabundear con sus colegas bebedores que a estudiar física— a

Stephen se le diagnosticó una esclerosis lateral amiotrófica, o enfermedad de Lou Gehrig. El avance de la enfermedad había sido rápido y, en el momento de la cena, Hawking estaba casi completamente paralizado. Aunque incapaz de escribir ecuaciones y apenas capaz de comunicarse, Stephen estaba manteniendo a raya su némesis médica, y al mismo tiempo estaba explotando ideas brillantes. El pronóstico era malo. La enfermedad de Lou Gehrig es una brutal asesina, y parecía inevitable que Stephen muriera en menos de dos años. Mientras, él estaba disfrutando, revolucionando alegremente (la palabra de Sciama) la física. En ese momento, la descripción que hacía Dermis del valor de Stephen frente a la adversidad parecía una exageración. Pero después de conocer a Stephen durante más de veinticinco años, yo diría que le describía muy bien.

Tanto Stephen como Sciama eran incógnitas para mí, y yo no sabía si los agujeros negros que se evaporan eran una historia inverosímil, una especulación marginal o una historia genuina. Era posible que me hubiera perdido partes importantes del argumento mientras me estaba informando de las leyes judías sobre el papel higiénico. Probablemente, Dermis sólo había contado la conclusión de Stephen sin ofrecer ningún soporte técnico. Después de todo, Sciama no era experto en los métodos avanzados de la teoría cuántica de campos que Hawking había utilizado. Como dije antes, él era un hombre de pocas ecuaciones.

Visto en retrospectiva, parece extraño que yo no relacionara la conferencia de Sciama con la breve conversación que había

mantenido dos años antes con Richard Feynman en el West End Café. Feynman y yo también estábamos especulando sobre cómo podrían desintegrarse finalmente los agujeros negros. Pero iban a pasar muchos meses antes de que yo juntase ambas ideas.

El argumento de Stephen

Según confiesa el propio Stephen, él no creía al principio la extraña conclusión a la que había llegado Jacob Bekenstein, el entonces desconocido estudiante de Princeton. ¿Cómo podían tener entropía los agujeros negros? La entropía está asociada con la ignorancia — ignorancia de la estructura microscópica oculta, tal como nuestra ignorancia de la localización precisa de las moléculas del agua en una bañera de agua caliente. La teoría de la gravedad de Einstein y la solución de agujero negro de Schwarzschild no tienen nada que ver con entidades microscópicas. Además, parece que no había nada que ignorar en un agujero negro. La solución de Schwarzschild de las ecuaciones de Einstein era única y precisa. Para cada valor de la masa y del momento angular, había una y sólo una solución de agujero negro. Eso es lo que John Wheeler quería decir cuando dijo «Los agujeros negros no tienen pelo». Por la lógica usual, una configuración única (recordemos el BMW perfecto del capítulo 7) no debería tener entropía. La entropía de Bekenstein no tenía sentido para Hawking... hasta que encontró su propia manera de pensar en ello.

La clave para Hawking era la temperatura, no la entropía. Por sí sola, la existencia de entropía no implica que un sistema tenga

temperatura⁴⁹. Una tercera magnitud, la energía, entra también en la ecuación. La relación entre energía, entropía y temperatura se remonta al origen de la termodinámica⁵⁰ a comienzos del siglo XIX. Las máquinas de vapor eran entonces el tema, y el francés Nicolas Léonard Sadi Carnot era lo que se podría llamar un ingeniero del vapor. Estaba interesado en una cuestión muy práctica: cómo utilizar el calor contenido en una cantidad dada de vapor para hacer trabajo útil de la forma más eficiente. En este caso, trabajo útil podría significar acelerar una locomotora, lo que requeriría convertir energía térmica en energía cinética de una gran masa de hierro.

Energía térmica significa la energía caótica y desorganizada del movimiento molecular aleatorio. Por el contrario, la energía cinética de una locomotora está organizada en el movimiento simultáneo sincronizado de un enorme número de moléculas, que se mueven todas juntas. Por ello, el problema era cómo transformar una cantidad dada de energía desorganizada en energía organizada. El problema era que nadie entendía realmente qué significaba exactamente energía organizada y desorganizada. Carnot fue el primero en definir la entropía como una medida de la desorganización.

Mi propia introducción en la entropía fue como estudiante de ingeniería mecánica. Ni yo ni ninguno de los demás estudiantes sabíamos nada sobre la teoría molecular del calor, y apostaría que el profesor tampoco lo sabía. La asignatura, Ingeniería Mecánica

⁴⁹ Lógicamente, es posible imaginar sistemas que pueden disponerse de muchas maneras sin cambiar su energía, pero esto nunca sucede en situaciones del mundo real.

⁵⁰ La termodinámica es el estudio del calor.

101: Termodinámica para ingenieros mecánicos, era tan confusa que yo, que era con mucho el mejor estudiante de la clase, no podía darle ningún sentido. Lo peor de todo era el concepto de entropía. Se nos decía que si se calienta algo, el cambio en energía térmica, dividido por la temperatura, es el cambio en entropía. Todos lo copiábamos, pero nadie entendía lo que quería decir. Para mí era tan incomprensible como «El cambio en el número de salchichas dividido por la cebollización se denomina fircastofa».

Parte del problema era que yo no entendía realmente la temperatura. Según mi profesor, la temperatura es lo que uno mide con un termómetro. «Sí», podría haber preguntado yo, «pero ¿qué es?». Estoy casi seguro de que la respuesta habría sido, «Ya se lo dije; es lo que uno mide con un termómetro».

Definir la entropía en términos de temperatura es poner el carro delante de los bueyes. Aunque es cierto que todos tenemos un innato sentido de la temperatura, los conceptos más abstractos de energía y entropía son mucho más básicos. El profesor debería haber explicado primero que la entropía es una medida de información oculta y viene dada en bits. Entonces podría haber salido diciendo (correctamente):

La temperatura es el aumento de la energía de un sistema cuando se añade un bit de entropía⁵¹.

⁵¹ Estrictamente hablando, es la temperatura (medida desde el cero absoluto) multiplicada por la constante de Boltzmann. La constante de Boltzmann no es otra cosa que un factor de conversión que los físicos fijan a veces como uno escogiendo unidades convenientes para la temperatura.

¿El cambio en la energía cuando se suma un bit? Eso es exactamente lo que Bekenstein había imaginado para un agujero negro. Aparentemente, Bekenstein había calculado la temperatura de un agujero negro sin darse cuenta.

Hawking vio inmediatamente lo que Bekenstein había pasado por alto, pero la idea de que un agujero negro tiene una temperatura le parecía tan absurda a Stephen que su primera reacción fue rechazarlo todo, entropía y temperatura, como algo sin sentido. Quizá esta reacción se debía en parte a que la evaporación de un agujero negro parecía ridícula. Yo no sé exactamente qué es lo que hizo a Hawking reconsiderar las cosas, pero lo hizo. Utilizando las matemáticas de la teoría cuántica de campos, encontró su propia vía para demostrar que los agujeros negros irradian energía.

El término teoría cuántica de campos refleja la confusión que había dejado el descubrimiento de los fotones por Einstein. Por una parte, Maxwell había demostrado convincentemente que la luz es una perturbación aleatoria del campo electromagnético. Él y otros habían considerado el espacio como algo que puede vibrar, casi como un cuenco de gelatina. Esta gelatina hipotética se denomina *Éter Luminífero* y, como sucede con la gelatina, cuando es perturbado por una vibración (en el caso de la gelatina, bastaría con tocarla con un diapasón vibrante), las ondas se dispersan desde la perturbación. Maxwell imaginó cargas eléctricas oscilantes que perturban el éter e irradian ondas luminosas. Los fotones de Einstein vinieron a confundir las cosas durante más de veinte años, hasta que finalmente Paul Dirac aplicó las poderosas matemáticas

de la mecánica cuántica a las vibraciones ondulatorias del campo electromagnético.

La consecuencia más importante de la teoría cuántica de campos para Hawking era la idea de que el campo electromagnético tiene «agitaciones cuánticas» (véase capítulo 4), incluso si ninguna carga vibrante está perturbándolo. En el espacio vacío, el campo electromagnético titila y vibra con *fluctuaciones del vacío*. ¿Por qué no sentimos las vibraciones del espacio vacío? No es porque sean muy suaves. De hecho, las vibraciones del campo electromagnético en una pequeña región del espacio son extraordinariamente violentas. Pero puesto que el espacio vacío tiene menos energía que cualquier otra cosa, no hay manera de que la energía de las fluctuaciones del vacío se transfiera a nuestro cuerpo.

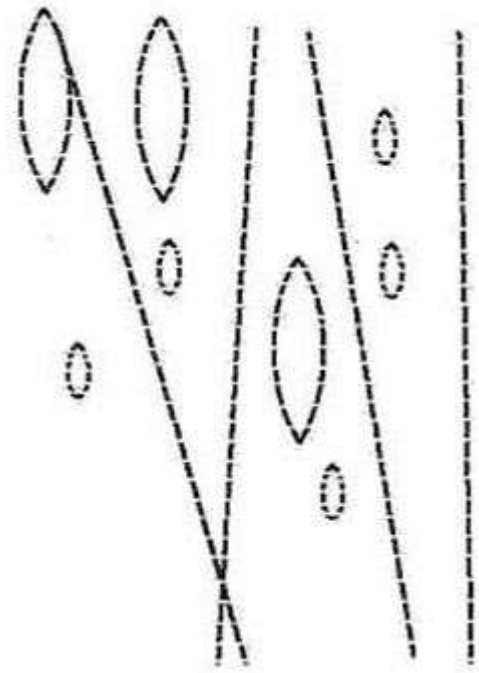
Hay otro tipo de agitación en la Naturaleza que es muy notable: las agitaciones térmicas. ¿Cuál es la diferencia entre un puchero de agua fría y un puchero de agua caliente? La temperatura, dirá usted. Pero eso es tan sólo una manera de decir que el agua caliente se siente caliente y el agua fría se siente fría. La diferencia real es que el agua caliente tiene más energía y más entropía; el puchero está lleno de moléculas que se mueven aleatoriamente y que son demasiado complicadas de controlar. Este movimiento no tiene nada que ver con la mecánica cuántica, y no es sutil. Ponga el dedo en el puchero y no tendrá ningún problema para detectar las fluctuaciones térmicas.

El movimiento térmico agitado de las moléculas individuales no puede verse porque las moléculas de agua son muy pequeñas, pero

el efecto inmediato de las agitaciones térmicas no es difícil de detectar. Como ya he mencionado, granos de polen suspendidos en un vaso de agua caliente se moverán con un movimiento browniano agitado y aleatorio, que no tiene nada que ver con la mecánica cuántica. Se debe al calor del agua, que hace que las moléculas de agua bombardeen aleatoriamente los granos. Cuando usted pone el dedo en el vaso, el mismo bombardeo aleatorio sobre su piel excita las terminaciones nerviosas y hace que el agua se sienta caliente. Su piel y sus nervios absorben algo de energía del calor ambiente. Incluso en ausencia de agua, aire o cualquier otra sustancia, los nervios sensibles al calor pueden ser excitados por las vibraciones térmicas de la radiación del cuerpo negro. En este caso, los nervios absorben calor del ambiente al absorber fotones. Pero esto sólo es posible si la temperatura está por encima del cero absoluto. En el cero absoluto, las agitaciones cuánticas del campo eléctrico y magnético son más sutiles y no tienen los mismos efectos obvios. Los dos tipos de agitaciones —la térmica y la cuántica— son muy diferentes y en condiciones ordinarias no se mezclan. Las fluctuaciones cuánticas son una parte irreducible de un vacío y no pueden eliminarse, mientras que las fluctuaciones térmicas se deben a un exceso de energía. Las sutilezas de las fluctuaciones cuánticas —por qué no podemos sentir las y cómo difieren de las fluctuaciones térmicas— están en el límite de la «explicabilidad» en un libro que trata de evitar las matemáticas complejas, y cualquier analogía o imagen que utilice tendrá sus defectos lógicos. Pero alguna explicación es necesaria para que usted capte lo que está en

juego en la guerra de los agujeros negros. Tan sólo recuerde la reserva de Feynman sobre la explicación de los fenómenos cuánticos (véase página 88).

La teoría cuántica de campos sugiere una manera de visualizar los dos tipos de fluctuaciones. Las fluctuaciones térmicas se deben a la presencia de fotones reales, fotones que bombardean nuestra piel y le transfieren energía. Las fluctuaciones cuánticas se deben a pares de fotones virtuales, que son creados y luego rápidamente absorbidos de nuevo en el vacío. He aquí un diagrama de Feynman del espacio-tiempo —el tiempo en vertical y el espacio en horizontal— con fotones reales y pares de fotones virtuales.



Los *fotones reales* son las líneas de universo de trazos que no acaban. Su presencia indica calor y agitaciones térmicas. Pero si el

espacio estuviera en el cero absoluto no habría fotones reales. Sólo habría bucles microscópicos de *fotones virtuales*, que nacen y mueren rápidamente. Los pares de fotones virtuales son parte del vacío —lo que normalmente consideramos espacio vacío— incluso cuando la temperatura está en el cero absoluto.

En condiciones ordinarias no hay confusión entre los dos tipos de agitaciones. Pero un horizonte de agujero negro no es nada ordinario. Cerca del horizonte los dos tipos de fluctuaciones se confunden de un modo que nadie esperaba. Para hacerse una idea de cómo sucede, imaginemos a Alicia en caída libre en el agujero en un ambiente a temperatura de cero absoluto: un vacío perfecto. Ella está rodeada por pares de fotones virtuales, pero no los advierte. No hay fotones reales en su vecindad.

Consideremos ahora a Bernardo, que se cierne sobre el horizonte. Para él las cosas son más confusas. Algunos de los pares de fotones virtuales —los que Alicia no advierte— pueden estar parcialmente dentro del horizonte y parcialmente fuera. Pero una partícula detrás del horizonte es irrelevante para Bernardo. Él ve un único fotón y no tiene manera de reconocer que pertenece a un par virtual. Créalo o no, dicho fotón, que permanece en el exterior mientras su compañero está detrás del horizonte, afectará a Bernardo y a su piel exactamente como si fuera un fotón térmico real. Cerca del horizonte, la separación entre térmico y cuántico depende del observador: lo que Alicia detecta (o no detecta) como agitaciones cuánticas, Bernardo lo detecta como energía térmica. Las fluctuaciones térmicas y cuánticas se convierten en dos caras de la

misma moneda con respecto a un agujero negro. Volveremos a este punto en el capítulo 20, cuando aprendamos algo sobre el «avión de Alicia».

Utilizando las matemáticas de la teoría cuántica de campos, Hawking calculó que la perturbación de las fluctuaciones del vacío debidas a un agujero negro hace que se emitan fotones, exactamente como si el horizonte del agujero negro fuera un cuerpo negro caliente. Estos fotones se llaman *radiación de Hawking*. Y lo que es más interesante, un agujero negro irradia como si su temperatura fuera aproximadamente la misma que daría el argumento de Bekenstein, si Bekenstein hubiera hecho el argumento. De hecho, Hawking fue capaz de ir más lejos que Bekenstein; sus métodos eran tan precisos que pudo calcular la temperatura exacta y, trabajando hacia atrás, la entropía del agujero negro. Bekenstein sólo había afirmado que la entropía era proporcional al área del horizonte medida en unidades de Planck. Hawking ya no tenía que utilizar el ambiguo término «proporcional a». Según su cálculo, la entropía de un agujero negro es precisamente un cuarto del área del horizonte medida en unidades de Planck.

Dicho sea de paso, la ecuación que Hawking obtuvo para la temperatura de un agujero negro era la que estaba en la pizarra cuando yo entré en la conferencia de Dermis Sciamia:

$$T = 116\pi^2 \times c^3 h G M k .$$

Nótese que en la fórmula de Hawking la masa del agujero negro está en el denominador. Eso significa que cuanto mayor es la masa, más frío es el agujero negro, y, recíprocamente, cuanto menor es la masa, más caliente es el agujero negro.

Ensayemos la fórmula para un agujero negro. Estos son los valores de las constantes⁵²:

$$c = 3 \times 10^8.$$

$$G = 6,7 \times 10^{-11}.$$

$$h = 7 \times 10^{-34}.$$

$$k = 1,4 \times 10^{-23}.$$

Tomemos el caso de una estrella con una masa cinco veces la del Sol que finalmente colapsa para formar un agujero negro. Su masa, en kilogramos, sería:

$$M = 10^{31}.$$

Si introducimos estos números en la fórmula de Hawking, encontramos que la temperatura del agujero negro es 10^{-8} Kelvin. Esto es una temperatura muy pequeña, unas diezmilmillonésimas de grado sobre el cero absoluto. Nada en el mundo natural está tan frío. El espacio interestelar, e incluso el intergaláctico, están mucho más calientes.

⁵² Todos estos números están dados en metros, segundos, kilogramos y Kelvin. La unidad de medida en la escala Kelvin es la misma que en la escala Celsius salvo que la temperatura se mide a partir del cero absoluto y no a partir del punto de congelación del agua. La temperatura ambiente ordinaria es de 300 Kelvin.

Hay agujeros negros de temperaturas aún más bajas en los centros de las galaxias. Siendo mil millones de veces más masivos que los agujeros negros estelares, y mil millones de veces más grandes, son también mil millones de veces más fríos. Pero también podemos contemplar agujeros negros mucho más pequeños. Supongamos que un suceso cataclísmico aplastara la Tierra. La masa de la Tierra es aproximadamente un millón de veces más pequeña que la masa de una estrella. El agujero negro resultante tendría la extraordinaria temperatura de casi 0,01 grados sobre el cero absoluto: más caliente que el agujero negro estelar pero aún terriblemente frío, más frío que el helio líquido y mucho más frío que el oxígeno congelado. Un agujero negro con la masa de la Luna llegaría hasta un grado Kelvin.

Pero consideremos ahora lo que sucede cuando un agujero negro emite radiación de Hawking y se evapora. A medida que la masa decrece y el agujero negro se contrae, la temperatura aumenta. Con el tiempo el agujero negro se calentará. Para cuando tenga la masa de una roca grande, su temperatura habrá crecido hasta un trillón de grados. Para cuando haya alcanzado la masa de Planck, su temperatura habrá ascendido a 10^{32} grados. El único momento y lugar en el universo en el que podría haber estado cerca de dicha temperatura era el comienzo del *Big Bang*.

El cálculo de Hawking que mostraba cómo se evaporan los agujeros negros era más que un brillante *tour de force*. Creo que con el tiempo, cuando las repercusiones sean plenamente entendidas, los físicos lo reconocerán como el comienzo de una gran revolución

científica. Es demasiado pronto para saber exactamente cuál será el resultado de dicha revolución, pero afectará a las cuestiones más profundas: la naturaleza del espacio y el tiempo, el significado de las partículas elementales y los misterios del origen del universo. Los físicos se preguntan incesantemente si Hawking se encuentra entre los más grandes físicos de todos los tiempos y dónde figura en la jerarquía. En respuesta a quienes dudan de la grandeza de Hawking, yo sólo sugeriré que vuelvan y lean su artículo de 1975 «Producción de partículas por los agujeros negros».

Pero por muy grande que pueda ser, al menos en una ocasión Stephen Hawking perdió la pista de sus bits, y eso es lo que inició la guerra de los agujeros negros.

Segunda parte

Ataque sorpresa

Capítulo 10

Cómo perdió Stephen sus bits y no supo dónde encontrarlos

Es imposible tal como lo digo, y por lo tanto debo haberme equivocado en algo.

SHERLOCK HOLMES

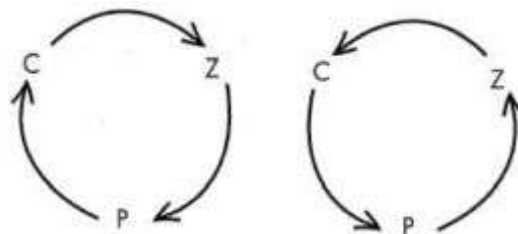
Según varios artículos de periódico, la guerra de Irak ha durado más que la segunda guerra mundial. Lo que los periodistas quieren decir realmente es que la guerra ha durado más que la implicación norteamericana en la segunda guerra mundial. Dicha guerra empezó en el otoño de 1939 y no terminó hasta el verano de 1945. Los norteamericanos tienden a olvidar que la guerra estaba en su tercer año cuando fue atacado Pearl Harbor.

Quizá estoy cometiendo el mismo error egocéntrico al decir que la guerra de los agujeros negros empezó en 1981 en el ático de Werner Erhard. El ataque de Stephen se remonta realmente a 1976, pero no puede haber una guerra sin que haya dos bandos. Aunque el ataque fue largamente ignorado, fue un asalto frontal a uno de los más respetados principios de la física: *la ley que dice que la información nunca se pierde*, o, en su forma breve, *la conservación de la*

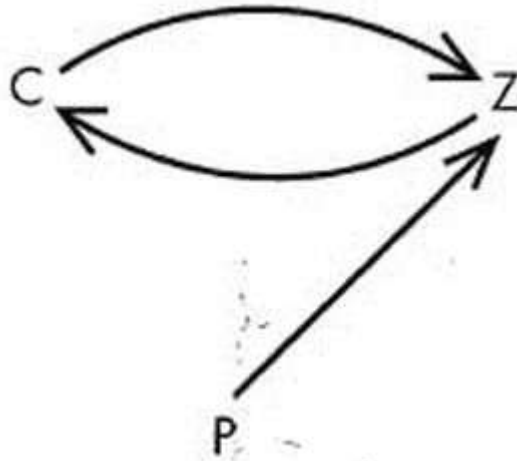
información. Puesto que es tan fundamental para todo lo que sigue, vayamos a la ley de conservación de la información una vez más.

La información es para siempre

¿Qué significa que la información se destruya? En física clásica, la respuesta es simple. La información se destruye si el futuro pierde la traza del pasado. Sorprendentemente, esto puede suceder incluso con una ley determinista. Para ilustrarlo, volvamos a la moneda de tres caras con la que jugamos en el capítulo 4. Las tres caras de la moneda se denominaban C, Z y P (por caras, cruces y pies). En ese capítulo describí dos leyes deterministas mediante los diagramas siguientes:



Ambas leyes tienen la propiedad determinista de que cualquiera que sea el estado de la moneda, es posible decir con certeza absoluta tanto el estado siguiente como el anterior. Compárela con una ley descrita por otro diagrama,



o por la fórmula

$$C \rightarrow Z \quad Z \rightarrow C \quad P \rightarrow Z$$

En palabras: si la moneda es cara en un instante, será cruz en el instante siguiente. Si es cruz, se transformará en cara. Y si es pie, a continuación será cruz. Esta regla es completamente determinista: donde quiera que uno empieza, el futuro está decidido para siempre por la ley. Supongamos, por ejemplo, que empezamos con P. La historia posterior está completamente determinada: PZCZCZCZCZ... Si empezamos con C, la historia será CZCZCZCZCZ... Y si empezamos con Z, será ZCZCZCZCZC...

Hay algo extraño en esta ley, pero ¿qué es exactamente? Como sucede con otras leyes deterministas, el futuro es completamente predecible. Pero cuando tratamos de determinar el pasado, las cosas se vienen abajo. Supongamos que la moneda está en el estado C. Podemos estar seguros de que el estado anterior era Z. Hasta aquí

todo bien. Pero tratemos de ir un paso más atrás. Hay dos estados que llevan a Z, a saber, C y P. Eso presenta un problema: ¿llegamos a Z desde C o desde P? No hay forma de saberlo. Esto es lo que significa perder información, pero nunca sucede en física clásica. Las reglas matemáticas en las que están basadas las leyes de Newton y la teoría electromagnética de Maxwell son muy claras: todo estado va seguido de un estado único, y todo estado está precedido por un estado único.

La otra manera en que se puede perder información es que haya cierta aleatoriedad en la ley. En ese caso, es obviamente imposible estar seguro del futuro o del pasado.

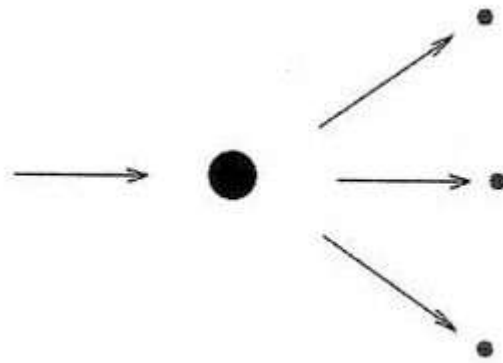
Como ya he explicado antes, la mecánica cuántica tiene su elemento aleatorio, pero hay también un sentido profundo en que la información no se pierde nunca. Lo ilustré para un fotón en el capítulo 4, pero lo haremos otra vez, esta vez utilizando un electrón que colisiona con un blanco en reposo tal como un núcleo pesado. El electrón procede desde la izquierda, moviéndose en dirección horizontal.



Colisiona con el núcleo y sale en una dirección impredecible. Un buen teórico cuántico puede calcular la probabilidad de que salga en una dirección particular, pero no puede predecir la dirección con certeza.

Hay dos maneras de comprobar si se ha conservado la información concerniente al movimiento inicial. Ambas implican llevar el electrón hacia atrás con una ley invertida.

En el primer caso, un observador comprueba dónde está el electrón inmediatamente antes de invertir la ley. Puede hacerlo de varias maneras, la mayoría de ellas utilizando fotones como sonda. En el segundo caso, el observador no se



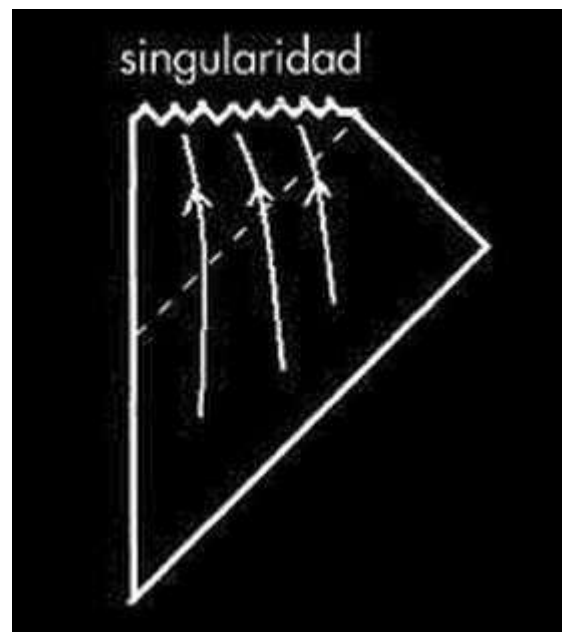
molesta en comprobar; simplemente invierte la ley sin interactuar de ninguna manera con el electrón. Los resultados de los dos experimentos son completamente diferentes. En el primer caso, el electrón, una vez que se le ha hecho ir hacia atrás, termina en una localización aleatoria y moviéndose en una dirección impredecible. En el segundo caso, cuando no se hace ninguna comprobación, el electrón siempre acaba invirtiendo su movimiento a lo largo de la dirección horizontal. Cuando el observador mira el electrón por primera vez después de empezar el experimento, lo encontrará moviéndose exactamente como empezó, sólo que al revés. Parece que la información sólo se pierde cuando interactuamos directamente con el electrón. En mecánica cuántica, mientras no interactuemos con un sistema, la información que éste lleva es tan indestructible como lo es en física clásica.

Stephen ataca

Habría sido difícil encontrar dos expresiones más tristes que las de Gerard 't Hooft y yo en San Francisco ese día de 1981. Sobre Franklin Street, en el ático de Werner Erhard, se había declarado la guerra, un ataque directo a nuestras creencias más profundas. Stephen el Temerario, Stephen el Atrevido, Stephen el Destructor tenía todas las armas pesadas, y su sonrisa angelical/diabólica mostraba que él lo sabía.

El ataque no era personal en modo alguno. El bombardeo estaba dirigido directamente contra el pilar central de la física: la indestructibilidad de la información. La información suele estar revuelta hasta resultar irreconocible, pero Stephen estaba argumentando que los bits de información que caen en un agujero negro se pierden para siempre para el mundo exterior. En la pizarra, él tenía el diagrama para demostrarlo.

En el curso de sus brillantes estudios de la geometría espacio-temporal, Roger Penrose había ideado una forma de visualizar la totalidad del espacio-tiempo en una simple pizarra o una hoja de papel. Incluso si el espacio-tiempo fuera infinito, Penrose lo distorsionaría y lo comprimiría de formas



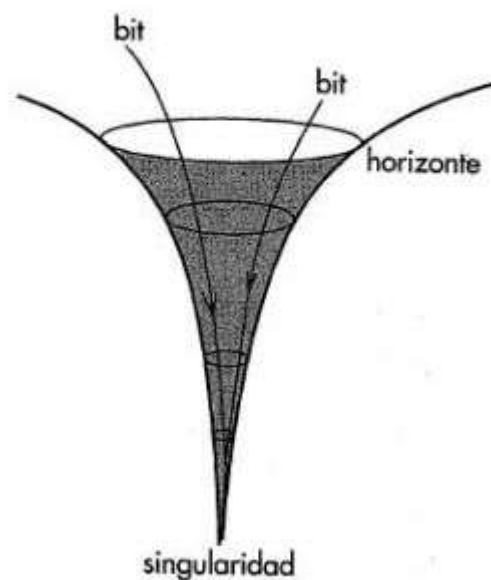
matemáticas ingeniosas para conseguir que todo encajara en un área finita. El diagrama de Penrose dibujado en la pizarra de la

mansión de Werner mostraba un agujero negro con bits de información que atravesaban el horizonte. El horizonte se mostraba como una delgada línea diagonal y, una vez que un bit había traspasado la línea, ya no podía escapar sin superar la velocidad de la luz. El diagrama demostraba también que cada uno de estos bits estaba condenado a dar en la singularidad.

Los diagramas de Penrose son herramientas indispensables para los físicos teóricos, pero se necesita un poco de práctica para entenderlos. He aquí una imagen más familiar que representa el mismo agujero negro.

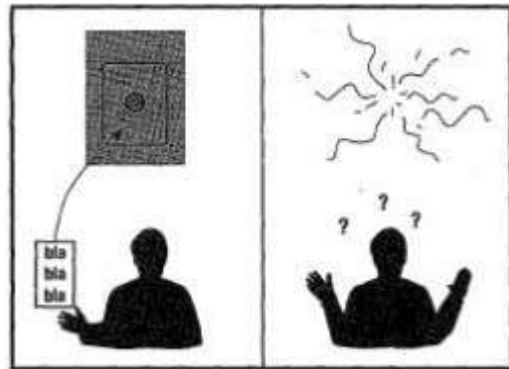
El punto de Stephen era simple. Los bits que caen en un agujero negro son como los renacuajos metafóricos en el capítulo 2, que rebasaban inconscientemente el punto de no retorno. Una vez que un bit atraviesa el horizonte, no hay forma de devolverlo al mundo exterior.

No era el hecho de que los bits de información pudieran perderse tras el horizonte lo que nos perturbaba tanto a 't Hooft y a mí. Dejar caer la información en un agujero negro no es peor que encerrarla en una bóveda herméticamente cerrada. Pero aquí había en juego algo mucho más siniestro. La posibilidad de ocultar información en una bóveda difícilmente provocaría alarma, pero ¿qué pasaría si cuando se cerrara la puerta, la bóveda se evaporara ante sus ojos? Eso es



exactamente lo que Hawking había predicho que sucedería con el agujero negro.

En 1981 hacía tiempo que yo había establecido la relación entre la evaporación del agujero negro y la conversación que había tenido con Richard Feynman en el West End Café en 1972. La idea de que los agujeros negros se desintegraran



con el tiempo en partículas elementales no me molestaba en absoluto. Pero la afirmación de Stephen me dejaba incrédulo:

Cuando un agujero negro se evapora, los bits de información atrapados desaparecen de nuestro universo. La información no está revuelta. Se pierde irreversiblemente y para siempre.

Stephen estaba bailando alegremente sobre la tumba de la mecánica cuántica, mientras que 't Hooft y yo estábamos completamente destrozados. Para nosotros, una idea semejante ponía en peligro todas las leyes de la física. Parecía que combinar la teoría de la relatividad general con las reglas de la mecánica cuántica iba a provocar un choque de trenes.

Yo no sé si 't Hooft conocía la idea radical de Stephen antes del encuentro en el ático de Werner, pero sí era la primera vez que yo la había oído. Incluso así, la idea no era nueva en ese momento. Stephen había expuesto sus argumentos varios años antes en un artículo publicado y había hecho cuidadosamente sus deberes. Él ya

había considerado y descartado todas las maneras en las que yo podía pensar para escapar de su «paradoja de la información». Veamos aquí cuatro de ellas.

Los agujeros negros no se evaporan realmente: Para muchos físicos, la conclusión de que los agujeros negros se evaporan era una gran sorpresa. Pero el argumento para la evaporación, aunque técnico, era extraordinariamente convincente. Estudiando las fluctuaciones cuánticas muy cerca del horizonte, Hawking, y también Bill Unruh, habían demostrado que los agujeros negros tienen una temperatura y, como cualquier otro objeto caliente, deben emitir radiación térmica (radiación de cuerpo negro). De cuando en cuando, aparecerá un artículo de física que afirma que los agujeros negros no se evaporan. Tales artículos desaparecen rápidamente en la papelera infinita de las ideas marginales.

Los agujeros negros dejan remanentes: Aunque la evaporación del agujero negro parecía sólida, estaba también el hecho de que a medida que se evaporan se hacen más calientes y más pequeños. En algún momento, un agujero negro en evaporación se hará tan caliente que emitirá partículas de energía enormemente alta. En su ráfaga final de evaporación, las partículas tendrán una energía mucho mayor que cualquier cosa de la que hayamos tenido experiencia. Muy poco se sabe de esta última boqueada. Quizá el agujero negro dejará de evaporarse cuando alcance la masa de Planck (la masa de una mota de polvo). En ese momento su radio

tendrá la longitud de Planck, y nadie puede decir con seguridad qué sucede a continuación. Existe la posibilidad lógica de que el agujero negro deje de evaporarse y quede un remanente —una bóveda de información en miniatura— en cuyo interior esté atrapada toda la información perdida. Según esta idea, cada bit de información que hubiera caído en el agujero negro quedaría herméticamente sellado en la caja fuerte infinitesimalmente pequeña. El minúsculo remanente planckiano tendrían una propiedad fantástica: sería una partícula infinitesimal en la que podría estar oculta cualquier cantidad de información.

Aunque la idea del remanente era una alternativa popular a la destrucción de la información (de hecho, mucho más popular que la idea correcta), nunca me atrajo. Parecía elaborada para evitar la cuestión. Pero no era sólo una cuestión de gustos. Una partícula que podía ocultar una cantidad de información infinita sería una partícula de entropía infinita. La existencia de tales partículas infinitamente entrópicas sería un desastre termodinámico: creadas por fluctuaciones térmicas, succionarían todo el calor de cualquier sistema. A mi modo de ver, no había que tomarse los remanentes demasiado en serio.

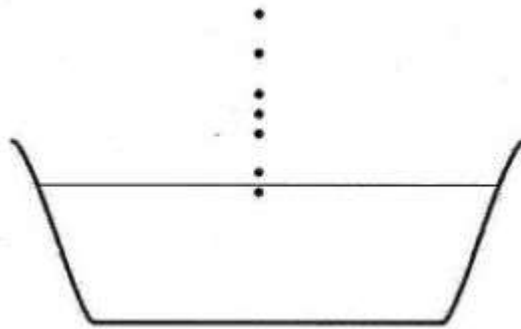
Nacen universos bebé: Continuamente recibo mensajes por correo electrónico que empiezan de la misma manera: «Yo no soy un científico, y no se mucho de física ni de matemáticas, pero creo que tengo la respuesta al problema en el que usted y Hawkins» —a veces es «Hawkings» y a veces «Haskins»— «han estado trabajando». La

solución propuesta en estos mensajes es casi siempre la de *universos bebé*. En algún lugar en el interior profundo de un agujero negro, un fragmento de espacio se desgaja y forma un universo minúsculo y autocontenido desconectado de nuestra porción del espacio-tiempo. (Siempre pienso en globos de helio que pasan y desaparecen). El autor sigue diciendo que toda la información que hubiera caído en el agujero negro queda atrapada en el universo bebé. Esto resuelve el problema: la información no se destruye; sólo está flotando en el hiperespacio, u omniespacio, o metaespacio, o dondequiera que vayan los universos bebé. Finalmente, después de que se evapora el agujero negro, la brecha en el espacio se cierra y, estando desconectados, los bits de información aislados se hacen totalmente inobservables.

Es posible que los universos bebé no sean completamente descabellados, especialmente si suponemos que los bebés crecen. Nuestro universo se está expandiendo. Quizá cada universo bebé se expande también y con el tiempo madura para convertirse en un universo con galaxias, estrellas, planetas, perros, gatos, personas y sus propios agujeros negros. Incluso es posible que nuestro propio universo se hubiera originado de esta manera. Pero como solución al problema de la información perdida, simplemente es una petición de principio. La física trata de observación y experimentación. Si los universos bebé portan información que se hace inobservable, el resultado para nuestro mundo será exactamente el mismo que si la

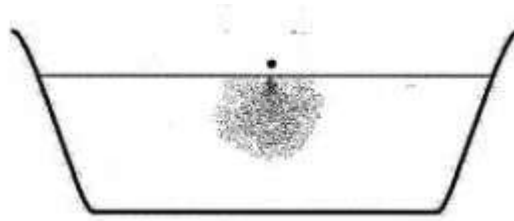
información se destruyera, con todas las consecuencias desafortunadas de la destrucción de información⁵³.

Consideremos la opción de la bañera: La opción de la bañera era el argumento menos popular contra la idea de Hawking. Los expertos en agujeros negros y en relatividad general la descartaban como algo que «no iba al grano». De todas formas, era la única posibilidad que tenía sentido para mí. Imagine gotas de tinta que caen en una palangana, levando un mensaje —drip, drip, drop, drill, drop, espacio, drop, drip.



Pronto las gotas bien definidas empiezan a disolverse, el mensaje se hace más difícil de leer y el agua se oscurece.

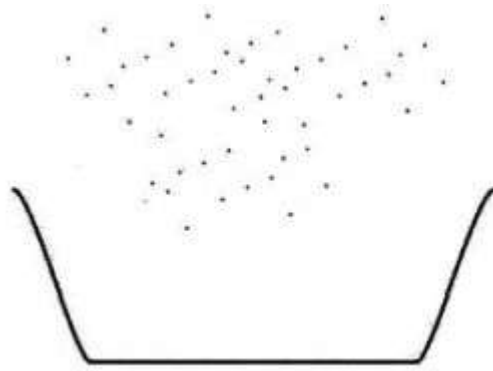
⁵³ En el capítulo 1 mencioné brevemente una de las más desafortunadas de dichas consecuencias: pérdida de información implica aumento de entropía, lo que a su vez significa producción de calor. Como Banks, Peskin y yo habíamos demostrado, las fluctuaciones cuánticas se convertirían en fluctuaciones térmicas y casi instantáneamente calentarían el mundo hasta temperaturas imposiblemente grandes.



Al cabo de pocas horas, todo lo que queda es una palangana uniforme con agua ligeramente gris.



Aunque desde un punto de vista práctico el mensaje está desesperadamente revuelto, los principios de la mecánica cuántica aseguran que sigue allí entre el inmenso número de moléculas en movimiento caótico. Pero pronto el fluido empieza a evaporarse del recipiente. Una molécula tras otra —de tinta tanto como de agua— escapan al espacio vacío dejando finalmente el recipiente seco y vacío. La información se ha ido, pero ¿se ha destruido? Aunque revuelta e imposible de recuperar mediante cualquier esquema práctico, no se ha borrado ni un solo bit de información. Es obvio lo que le ha sucedido: se ha ido con los productos de la evaporación, la nube molecular vaporosa que escapa al espacio.



Volviendo a los agujeros negros, ¿qué sucede con la información que previamente cayó en un agujero negro cuando el agujero negro se evapora? Si un agujero negro es algo parecido a una bañera, la respuesta es la misma: cada bit de información es transferido finalmente a los fotones y a otras partículas que se llevan la energía del agujero negro. En otras palabras, la información está almacenada entre las muchas partículas que constituyen la radiación de Hawking. 'T Hooft y yo estábamos seguros de que era así, pero prácticamente nadie que supiera mucho de agujeros negros nos creía.

Hay otra manera de entender la paradoja de la información de Hawking. En lugar de dejar que el agujero negro desaparezca, podemos seguir alimentándolo con nuevas cosas —ordenadores, libros, discos compactos— mientras se evapora, al ritmo preciso para impedir que se contraiga. En otras palabras, suministramos al agujero negro una incesante corriente de información para impedir que se haga más pequeño. Según Hawking, incluso si el agujero negro no creciera (se evaporara mientras era alimentado), la información sería engullida, aparentemente sin fin.

Todo esto me recuerda mi juego circense favorito. Cuando era niño, me gustaban los payasos más que cualquier otra cosa, y de todos los juegos de payasos el que más me fascinaba era el truco del coche del payaso. No sé cómo lo hacían, pero un buen número de payasos se introducían en un coche muy pequeño. Pero ¿qué pasa si un incesante flujo de payasos siguiera entrando en el coche, sin que saliera ninguno? Eso no podría continuar indefinidamente, ¿no es verdad? La capacidad de payasos de cualquier coche es finita, y una vez que la capacidad se saturara, algo —quizá payasos, quizá salchichas— tendría que empezar a salir.

La información es como los payasos, y los agujeros negros son como coches de payasos. Para cada agujero negro de un tamaño dado hay un máximo número de bits que el agujero negro puede soportar. Ahora usted puede conjeturar que el límite es la entropía del agujero negro. Si un agujero negro es como cualquier otro objeto, una vez que se carga a plena capacidad, o bien el agujero negro debe crecer o debe empezar a fugarse información. Pero ¿cómo puede haber fugas si el horizonte es realmente un punto de no retorno?

¿Era Stephen demasiado estúpido para ver que la radiación de Hawking podía contener la información oculta? Por supuesto que no. Pese a su juventud, Stephen sabía de los agujeros negros tanto como el que más, y mucho más de lo que sabía yo. Él había reflexionado muy profundamente sobre la opción de la bañera y tenía poderosas razones para rechazarla.

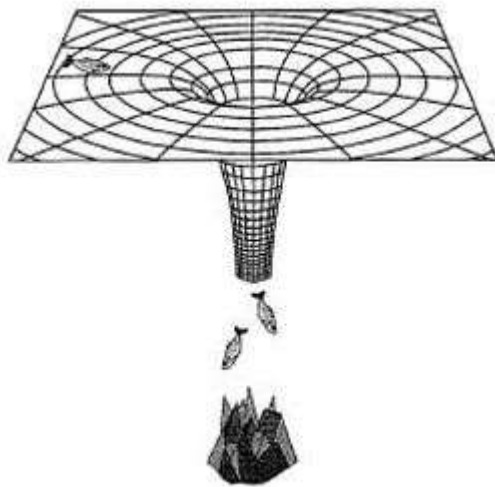
La geometría del agujero negro de Schwarzschild era plenamente entendida hacia mediados de los años setenta. Todo el que estaba

familiarizado con el tema veía el horizonte como un mero punto de no retorno. Como en la analogía del agujero del desagüe, la teoría de Einstein predecía que alguien que cruzara el horizonte inadvertidamente no notaría nada especial; el horizonte es una superficie matemática sin realidad física.

Los dos hechos más importantes que habían sido implantados en la psique de los relativistas eran los siguientes:

- No hay ningún obstáculo en el horizonte que pueda impedir que un objeto pase al interior de un agujero negro.
- Nada, ni siquiera un fotón —ninguna señal de ningún tipo— puede volver desde detrás del horizonte. Para hacerlo tendría que superar la velocidad de la luz —una imposibilidad según Einstein.

Para aclarar el punto, volvamos al lago infinito del capítulo 2 y el peligroso desagüe en el centro.



Imaginemos un bit de información que flota corriente abajo. Mientras no haya cruzado el punto de no retorno, el bit puede ser recuperado. Pero no hay ninguna advertencia en el punto de no retorno; el bit lo rebasará, y una vez que lo haya hecho, no puede volver sin superar la velocidad límite. El bit se ha perdido para siempre.

Las matemáticas de la teoría de la relatividad general eran muy claras acerca de los horizontes de agujeros negros. Eran simplemente puntos de no retorno sin marcas y no presentaban ningún obstáculo para los objetos en caída.

Esa era la lógica que había quedado profundamente enraizada en la conciencia de todos los físicos teóricos. Era la razón por la que Hawking estaba seguro de que los bits no sólo caerían a través del horizonte, sino que también se perderían permanentemente para el mundo exterior. Por eso, cuando descubrió que los agujeros negros se evaporan, Stephen razonó que la información no podía escapar con la radiación. Quedaría detrás; pero ¿detrás de dónde? Una vez que el agujero negro se evaporara, no quedaría nada en donde ocultarse.

Dejé la casa de Werner de mal humor. Hacía mucho frío para lo que es normal en San Francisco, y todo lo que llevaba era una chaqueta ligera. No podía recordar dónde había dejado mi automóvil, y estaba muy irritado con mis colegas. Antes de partir había tratado de discutir con ellos el argumento de Stephen y me había sorprendido su aparente falta de curiosidad y preocupación. El grupo estaba formado básicamente por físicos de partículas elementales que no

tenían gran interés en la gravedad. Como Feynman, ellos pensaban que la escala de Planck estaba tan remota que no podía afectar a las propiedades de las partículas elementales. Roma estaba ardiendo, los Hunos estaban a las puertas, y nadie lo advertía.

Mientras volvía a casa en mi coche, mi parabrisas se escarchaba, y el tráfico era tan intenso que tuve que pararme varias veces en la Carretera 101. Sencillamente no podía sacarme de la cabeza la afirmación de Stephen. La combinación de los atascos y el hielo me permitió garabatear en el parabrisas algunos diagramas y una o dos ecuaciones, pero no podía ver ninguna escapatoria. O bien la información se perdía y sería necesario reconstruir por completo las reglas básicas de la física, o había algo fundamentalmente equivocado en la teoría de la gravedad de Einstein cerca del horizonte de un agujero negro.

¿Cómo veía las cosas 't Hooft? Yo diría que con gran claridad. Su resistencia a las afirmaciones de Stephen era inequívoca. En el próximo capítulo explicaré el punto de vista de Gerard, pero antes explicaré el significado de la matriz S , su arma más poderosa.

Capítulo 11

La resistencia danesa

Consideremos una visión amplia de la historia; no de nuestra propia historia, sino la de un Sistema Solar con una estrella central diez veces más masiva que el Sol. No fue siempre un Sistema Solar; empezó como una gigantesca nube de gas, fundamentalmente hidrógeno y átomos de helio, pero también un poco de todo lo demás en la tabla periódica. Además, había algunos electrones libres e iones. En otras palabras, empezó como una nube de partículas muy difusa.

Luego la gravedad empezó a hacer su trabajo. La nube empezó a concentrarse. Se contrajo bajo su propio peso y, mientras lo hacía, la energía potencial gravitatoria se transformó en energía cinética. Las partículas empezaron a moverse a más velocidad, mientras disminuía el espacio entre ellas. A medida que la nube se contraía, también se calentaba, hasta que se hizo lo suficientemente caliente para encenderse y convertirse en una estrella. Mientras tanto, no todo el gas quedó atrapado en la estrella; parte quedó en órbita y se condensó en planetas, asteroides, cometas y otros residuos.

Pasaron decenas de millones de años antes de que la estrella agotara el hidrógeno, momento en que empezó una corta vida — quizá algunos cientos de miles de años— como una supergigante roja. Finalmente, murió en una violenta implosión, formando un agujero negro.

Luego, lentamente, muy lentamente, el agujero negro irradió su masa. La evaporación de Hawking lo erosionó, a medida que su energía era emitida como fotones y otras partículas. Al cabo de un tiempo terriblemente largo —algo así como 10^{68} años— el agujero negro desapareció en una ráfaga final de partículas de alta energía. Para entonces, hacía tiempo que los planetas se habían desintegrado en partículas elementales.

Entran partículas y salen partículas: esa es la visión de la historia a largo plazo. Todas las colisiones entre partículas elementales, incluidas las que tienen lugar en los laboratorios, empiezan y terminan de la misma forma —las partículas se aproximan, las partículas se alejan— y algo sucede entre medias. Entonces, ¿en qué se diferencia fundamentalmente la larga historia estelar, incluso si temporalmente incluye un agujero negro, de cualquier colisión entre partículas elementales? La visión de Gerard 't Hooft era que no había diferencia y que esto podía ser la clave para explicar porque Hawking estaba equivocado.

Las colisiones entre partículas —tanto átomos como partículas elementales— se describen mediante un objeto matemático llamado la matriz-S, donde S viene de *scattering* (dispersión). La matriz-S es una tabla gigante de todas las posibles entradas y salidas en una colisión, así como de algunas cantidades que pueden procesarse en probabilidades. No es una tabla en un libro grueso, sino una abstracción matemática.

Consideremos esto: un electrón y un protón se acercan a lo largo del eje horizontal con velocidades respectivas de un 20 por 100 y un 4

por 100 de la velocidad de la luz. ¿Cuál es la probabilidad de que colisionen y emerjan como un electrón y un protón finales, junto con cuatro fotones adicionales? La matriz-S es una tabla matemática de tales probabilidades —estrictamente hablando, amplitudes de probabilidad— que resume la historia cuántica de la colisión. 'T Hooft creía profundamente, igual que yo, que toda una historia estelar —nube de gas-Sistema Solar-gigante roja-agujero negro-radiación de Hawking— podía resumirse mediante una matriz-S.

Una de las propiedades más importantes de la matriz-S es la reversibilidad. Para ayudarle a entender el significado de este término, le daré un ejemplo muy extremo. El experimento mental implica la colisión de dos «partículas». Una de estas partículas es un bit inusual. Más que ser una partícula elemental, está compuesta de un enorme número de átomos de plutonio. De hecho, esta partícula altamente peligrosa es una bomba nuclear, con una espoleta tan delicada que un solo electrón puede activarla.

La otra partícula que interviene en la colisión es un electrón. La entrada inicial en la tabla de la matriz-S es «bomba y electrón». ¿Qué sale? Fragmentos de todo tipo. Una desordenada erupción de átomos de gas caliente, neutrones, fotones y neutrinos. Por supuesto, la matriz-S real sería increíblemente complicada. Habría que hacer la lista detallada de los fragmentos, junto con sus velocidades y direcciones, y luego habría que asignar una amplitud

de probabilidad a cada resultado final. Una versión tremendamente supersimplificada de la matriz-S tendría esta apariencia⁵⁴:

| | | Salida | | | |
|---------|------------------|---|--------------------------|----------------|------|
| | | Un electrón, un protón y cuatro fotones | + | + | + |
| | | | Fragmentos | Más fragmentos | |
| Entrada | Electrón y fotón | $.002 + .321 i$ | | | |
| | + | | | | |
| | + | | Análisis de probabilidad | | |
| | + | | | | |
| | + | | | | |
| | Bomba y electrón | | $.012 + .003 i$ | | 1.43 |

Volvamos ahora a la reversibilidad. La matriz-S tiene una propiedad llamada «ser invertible». Ser invertible es una forma matemática de describir la ley que dice que nunca se pierde información. La inversa de una matriz-S es una operación que deshace los cambios que hace la matriz-S. En otras palabras, es exactamente lo mismo que describí antes como *invertir la ley*. La inversa de la matriz-S lleva todo hacia atrás, de la salida a la entrada. También puede considerarse como invertir el movimiento de todas las partículas finales y seguir el sistema al revés, algo muy parecido a pasar una película hacia atrás. Si, una vez completada la colisión, se aplica la inversión (correr las cosas hacia atrás), los fragmentos se juntarán y recompondrán la bomba original, incluida toda su circuitería y sus delicados mecanismos de alta precisión. ¡Ah, sí!, y también estará el electrón original, ahora alejándose de la bomba. En otras palabras, la matriz-S no sólo predice el futuro a partir del pasado, sino que también permite reconstruir el pasado a partir del futuro. La matriz

⁵⁴ La matriz-S real tendría un número infinito de entradas y salidas, y cada caja tendría una entrada numérica compleja.

S es un código cuyos detalles aseguran que nunca se pierde ninguna información.

Pero el experimento es muy difícil. El más mínimo error —un fotón perturbado— destruirá el código. En particular, no se debe mirar, ni interferir de ninguna otra forma con siquiera una sola partícula, antes de invertir la acción. Si se hace, en lugar de la bomba y el electrón originales, todo lo que se obtendrá es más revoltijo aleatorio de fragmentos.

Gerard 't Hooft combatió en la guerra de los agujeros negros bajo el estandarte de la matriz-S. Su idea era simple: la formación y posterior evaporación de un agujero negro es simplemente un ejemplo muy complejo de una colisión de partículas. No difiere en ningún aspecto fundamental de la colisión entre un electrón y un protón en el laboratorio. De hecho, si se pudiera aumentar la energía del electrón y el protón que colisionan en proporciones prodigiosas, la colisión crearía un agujero negro. El colapso de una nube de gas es sólo una forma de crear un agujero negro. Con un acelerador suficientemente grande, tan sólo dos partículas que colisionen crearían un agujero negro que se evaporaría posteriormente.

Para Stephen Hawking, el hecho de que la matriz-S implica conservación de la información demostraba que debe ser una descripción errónea de la historia del agujero negro. Su idea era que los detalles precisos de la nube de gas —si estaba hecha de hidrógeno, helio o de gas de la risa— se irían por el desagüe, pasado el punto de no retorno, y desaparecerían con el agujero negro

cuando éste se evaporara. Ya el gas original tuviera grumos o fuera suave, ya contuviera muchas o pocas partículas, todos estos detalles se perderían para siempre. Invertir todas las partículas finales y dejar que todo marchara hacia atrás no reconstruiría la entrada original. Según Hawking, el resultado de invertir la radiación final sólo sería más radiación de Hawking indiferenciada. Si Hawking estaba en lo cierto, el episodio completo —partículas-agujero negro-radiación de Hawking— no podría describirse mediante las matemáticas habituales de la matriz-S. Y por ello Stephen ideó un nuevo concepto para reemplazarlo. El nuevo código tendría un grado extra de aleatoriedad que borraría la información original. Para reemplazar a la matriz-S, Stephen inventó la «matriz-no-S», él la llamó la matriz-\$ y llegó a conocerse como la *matriz-dólar*.

Como la matriz-S, la matriz-dólar es una regla para relacionar lo que entra con lo que sale. Pero en lugar de conservar las diferencias inherentes en puntos de partida distintos, en el caso de un agujero negro difumina estas diferencias hasta el punto en que sea lo que sea lo que entra —Alicia, una pelota de béisbol, una *pizza* de tres días— cuando se invierte sale siempre lo mismo. Arroje su ordenador con todos sus archivos a un agujero negro y lo que sale es radiación de Hawking uniforme. Si usted invierte la acción, la matriz-S escupirá el ordenador, pero la matriz-\$ devolverá más radiación de Hawking uniforme. Según Hawking, toda la memoria del pasado se pierde en el corazón del agujero negro transitorio.

Era un jaque continuo frustrante: Gerard decía matriz-S; Stephen decía matriz- \mathcal{S} . Los argumentos de Stephen eran claros y persuasivos, pero la fe de Gerard en las leyes de la mecánica cuántica era inquebrantable.

Quizá, como dicen algunos, Gerard y yo nos resistíamos a la conclusión de Stephen porque éramos físicos de partículas, no relativistas. Casi toda la metodología de la física de partículas se mueve en torno al principio de que las colisiones entre partículas están gobernadas por una matriz-S invertible. Pero yo no creo que fuera el chauvinismo de la física de partículas lo que subyacía en nuestra negativa a abandonar las reglas. Toda la física, no sólo la física de los agujeros negros, se iría al diablo una vez que se abriera la puerta a la pérdida de información. El desafío de Stephen había prendido la mecha de un cartucho de dinamita teórica.

Dicho esto, quizá es ahora un buen momento para explicar por qué los físicos creen que puede invertirse la explosión de una bomba. Desde luego no es posible ensayarlo en el laboratorio. Pero supongamos que fuera posible recoger todos los átomos y fotones salientes y darles la vuelta. Si pudiera hacerse con precisión infinita, las leyes de la física llevarían a una bomba reconstruida. Pero el más mínimo error, quizá un solo fotón perdido o incluso un minúsculo error en la dirección de un fotón, sería desastroso. Los errores mínimos pueden amplificarse. Un simple espermatozoide que hubiera errado su blanco podría haber cambiado la historia si dicho espermatozoide hubiera pertenecido al padre de Gengis Kan. En el billar, un cambio infinitesimal en la forma en que las bolas

están colocadas inicialmente, o en la dirección de la primera tacada, se amplificaría al cabo de unas pocas colisiones y llevaría a un resultado completamente diferente. Y así sucede con una bomba que explota o un par de partículas de alta energía que colisionan: un mínimo error al invertir el movimiento, y el resultado no se parecerá en nada a la bomba o a las partículas originales.

Entonces, ¿cómo podemos estar seguros de que una inversión perfecta de los fragmentos recompondrá la bomba? Lo sabemos porque las leyes matemáticas fundamentales de la física atómica son reversibles. Dichas leyes han sido comprobadas con increíble precisión en contextos mucho más sencillos que bombas. Una bomba no es otra cosa que una colección de átomos. Es demasiado complicado seguir el desarrollo de unos 10^{27} átomos cuando se produce la explosión, pero nuestro conocimiento de las leyes de los átomos es muy seguro.

Pero ¿qué reemplaza a los átomos, y a las leyes de la física atómica cuando una bomba que explota se reemplaza por un agujero negro que se evapora? Aunque 't Hooft tenía muchas ideas brillantes sobre la naturaleza de los horizontes, no tenía ninguna respuesta clara para esta pregunta. Bueno, él sabía que los átomos tenían que reemplazarse por los objetos microscópicos que constituían la entropía del horizonte. Pero ¿qué eran, y cuáles eran las leyes precisas que gobiernan su movimiento, combinación, separación y recombinación? 'T Hooft no lo sabía. Hawking y muchos otros relativistas simplemente descartaban la idea de tal soporte

microscópico, diciendo «la segunda ley de la termodinámica nos dice que los procesos físicos no pueden invertirse».

De hecho, no es esto lo que dice la segunda ley. Sólo dice que invertir la física es increíblemente difícil, y el más mínimo error derrotará nuestros esfuerzos. Además, o conoce mejor los detalles exactos —la microestructura— o usted fracasará.

Mi propia idea en aquellos primeros años de la controversia era que la matriz-S, y no la matriz-\$, era la correcta. Pero decir simplemente «S, no \$» no sería convincente. Lo mejor que se podía hacer era tratar de descubrir el misterioso origen microscópico de la entropía del agujero negro. Sobre todo, era necesario entender qué estaba equivocado en el argumento de Stephen.

Capítulo 12

¿A quién le importa?

Nadie va a utilizar nunca la radiación de Hawking para curar el cáncer o para hacer una máquina de vapor más eficiente. Los agujeros negros nunca serán útiles para almacenar información ni para engullir misiles enemigos. Peor aún, a diferencia de la física de partículas elementales o de la astronomía intergaláctica —dos disciplinas que quizá tampoco tengan aplicaciones prácticas— la teoría cuántica de la evaporación de un agujero negro probablemente no llevará nunca a observaciones directas o experimentos. ¿Por qué, entonces, alguien va a perder su tiempo con ella?

Antes de decirle por qué, déjeme explicar por qué es poco probable que se observe alguna vez la radiación de Hawking. Demos por hecho que en el futuro seremos capaces de acercarnos lo suficiente a un agujero negro para observarlo con cierto detalle. Incluso entonces, no hay probabilidad de observar cómo se evapora por una razón muy simple: ningún agujero negro astronómico se está evaporando actualmente. Todo lo contrario, todos están absorbiendo energía y están creciendo; incluso el agujero negro más aislado está rodeado de calor. Las regiones más vacías del espacio intergaláctico, por frías que estén, siguen estando mucho más calientes que un agujero negro de masa estelar. El espacio está lleno de la radiación de cuerpo negro (fotones) que dejó el *Big Bang*. El lugar más frío en el universo está a unos tórridos tres grados sobre el cero absoluto,

mientras que los agujeros negros más calientes son cien millones de veces más fríos.

El calor, la energía térmica, siempre fluye de caliente a frío, nunca al revés, de lo que se sigue que la radiación de las regiones más calientes del espacio fluye hacia los agujeros negros más fríos. En lugar de evaporarse y contraerse, como harían si la temperatura del espacio fuera el cero absoluto, los agujeros negros reales están absorbiendo energía y creciendo constantemente.

El espacio fue en otro tiempo mucho más caliente de lo que es hoy, y en el futuro la expansión del universo lo hará más frío. Con el tiempo, en algunos cientos de miles de millones de años, se enfriará hasta el punto en que estará más frío que los agujeros negros de masa estelar. Cuando eso suceda, los agujeros negros empezarán a evaporarse. (¿Habrá alguien para verlo? Quién sabe, pero seamos optimistas). Además, la evaporación será extraordinariamente lenta —se necesitarán al menos 10^{60} años para detectar cualquier cambio en la masa o el tamaño de un agujero negro— de modo que es poco probable que alguien detecte alguna vez un agujero negro que se contrae. Finalmente, incluso si efectivamente tuviéramos todo el tiempo del mundo, no habría esperanzas de desenredar la información contenida en la radiación de Hawking.

Si no hay ninguna esperanza en descifrar los mensajes en la radiación de Hawking y no hay ninguna razón práctica para hacerlo, ¿por qué el problema ha fascinado a tantos físicos? En cierto sentido, la respuesta es muy egoísta: lo hacemos para satisfacer

nuestra curiosidad sobre cómo funciona el universo y cómo encajan las leyes de la física.

Lo cierto es que buena parte de la física sigue este patrón. A veces, cuestiones prácticas han llevado a profundos desarrollos científicos. Por poner un ejemplo, Sadi Carnot, el ingeniero del vapor, revolucionó la física mientras trataba de construir una máquina de vapor mejor. Pero más a menudo ha sido la pura curiosidad la que ha llevado a los grandes cambios de paradigma en la física. La curiosidad es como un prurito; pide que se rasque. Y para un físico, nada pica más que una paradoja, una incompatibilidad entre varias cosas que uno cree que conoce. No saber cómo funciona algo es bastante malo, pero encontrar contradicciones entre cosas que usted creía saber es insoportable, particularmente cuando está implicado un choque entre principios fundamentales. Vale la pena recordar algunos de estos choques y cómo llevaron a la física a sus conclusiones más trascendentales.

Los antiguos filósofos griegos dejaron un legado paradójico, un choque entre dos teorías incompatibles que gobiernan mundos de fenómenos completamente separados: el mundo celeste y el mundo terrestre. *Celeste* se refería al mundo de los cuerpos del firmamento, lo que llamamos astronomía. El mundo celeste era un mundo mejor, más limpio, más perfecto: un mundo de precisión mecánica, perfecta y eterna. De hecho, según Aristóteles, todos los cuerpos celestes se movían en una de cincuenta y cinco esferas cristalinas perfectas y concéntricas.

Por el contrario, las leyes de los fenómenos terrestres se consideraban corruptas. Nada se movía de forma simple en la sucia superficie de la Tierra. Un carro pesado se bambolearía y se quedaría parado a menos que un caballo tirara continuamente de él. Los bloques de materia caerían irremediablemente al suelo, y allí se quedarían. Estas leyes básicas gobernaban los cuatro elementos: el fuego asciende, el aire se cierne, el agua cae y la tierra se hunde a la máxima profundidad.

Aparentemente los griegos se sentían a gusto con dos conjuntos de reglas completamente diferentes. Pero Galileo, e incluso en mayor medida Newton, encontraban intolerable esta dicotomía. El simple experimento mental de Galileo echó por tierra la idea de que podía haber dos conjuntos independientes de leyes de la Naturaleza. Él se imaginaba lanzando una piedra desde la cima de una montaña, primero con fuerza suficiente para que cayera a pocos metros de sus pies; luego, con más fuerza, de modo que recorriera miles de kilómetros antes de aterrizar; y luego aún más fuerte, de modo que recorriera toda la circunferencia de la Tierra. Él comprendió que la piedra daría la vuelta a la Tierra en una órbita circular. Eso creaba una nueva paradoja: ¿cómo podían las leyes de los fenómenos terrestres ser completamente diferentes de las leyes de los fenómenos celestes si una piedra terrestre podía convertirse en un cuerpo celeste?

Newton, que nació el mismo año en que murió Galileo, resolvió el enigma. Comprendió que la misma ley de la gravedad que hacía caer las manzanas de los árboles también mantenía a la Luna en órbita

alrededor de la Tierra, y a la Tierra en órbita alrededor del Sol. Sus leyes del movimiento y de la gravedad eran las primeras leyes físicas generales con validez universal. ¿Sabía Newton lo útiles que serían para los futuros ingenieros aeroespaciales? Es dudoso que le hubiera preocupado. Lo que le impulsaba era la curiosidad, no las cuestiones prácticas.

El siguiente gran picor que viene a la mente es el que Ludwig Boltzmann se rascaba tan denodadamente. De nuevo, un choque de principios: ¿cómo una ley de una sola dirección, que requiere que la entropía aumente siempre, podía coexistir con las leyes reversibles del movimiento de Newton? Si, como creía Laplace, el mundo estaba hecho de partículas que obedecen las leyes de Newton, entonces sería posible hacerlas ir hacia atrás. Finalmente, Boltzmann resolvió el problema, primero reconociendo que la entropía es *información microscópica oculta* y luego advirtiendo que la entropía *no siempre* aumenta. De vez en cuando, ocurre un suceso improbable. Usted baraja un mazo de cartas al azar, y por puro azar queda en perfecto orden numérico, con los oros seguidos de las copas seguidas de las espadas y seguidas de los bastos. Pero los sucesos que disminuyen la entropía son rarísimas excepciones. Boltzmann resolvió la paradoja diciendo que *la entropía casi siempre aumenta*. Hoy, la visión estadística de la entropía de Boltzmann es el fundamento de las ciencias de la información, pero para él, el enigma de la entropía era sólo un terrible picor que había que rascar.

Es interesante que en los casos de Galileo y Boltzmann los choques no se pusieron de manifiesto gracias a nuevos y sorprendentes

descubrimientos científicos. La clave en cada caso fue un correcto experimento mental. Ni el experimento de lanzamiento de la piedra de Galileo ni el de inversión temporal de Boltzmann se llegaron a realizar; bastaba con reflexionar sobre ellos. Pero el gran maestro de los experimentos mentales fue Albert Einstein.

Dos contradicciones profundamente perturbadoras afligían a los físicos a comienzos del siglo XX. El primero era un conflicto entre los principios de la física newtoniana y la teoría de la luz de Maxwell. El Principio de Relatividad, que asociamos tan estrechamente con Einstein, se remonta en realidad a Newton y, aún más atrás, a Galileo. Es un simple enunciado sobre las leyes de la física vistas desde diferentes sistemas de referencia. Para ilustrarlo, imaginemos a un artista de circo —un malabarista— que sube a un tren para ir a la ciudad vecina. Mientras está en el tren, siente la necesidad de practicar sus juegos malabares. Al no haberlos ensayado nunca en un tren en movimiento, se pregunta, «¿Tendré que compensar el movimiento del tren cada vez que lance una bola al aire y la recupere? Veamos. El tren se mueve hacia el oeste. Por lo tanto, para recoger la bola, será mejor que ponga la mano un poco al este». Él lo intenta con una sola bola. La lanza hacia arriba, mueve al este la mano que recoge y la bola cae al suelo. Lo intenta otra vez, esta vez reduciendo la compensación hacia el este. La bola cae al suelo de nuevo.

El caso es que el tren es de gran calidad. Los raíles son tan suaves y el sistema de suspensión tan perfecto que el movimiento del tren es indetectable para los pasajeros. El malabarista sonrío y se dice, «Lo

entiendo. Sin que yo me diera cuenta, el tren se detuvo. Hasta que se ponga en marcha de nuevo, puedo practicar de la forma habitual. Volveré a las viejas leyes del juego». Funciona perfectamente.

Imagine su sorpresa cuando mira por la ventanilla y ve pasar el paisaje a más de 150 kilómetros por hora. Profundamente intrigado, el malabarista pide una aclaración a su amigo el payaso (que resulta ser un profesor de física de Harvard de vacaciones). Esto es lo que dice el payaso: «Según los principios de la mecánica newtoniana, las leyes de movimiento son las mismas en todos los sistemas de referencia, siempre que se estén moviendo con velocidad uniforme unos respecto a otros. Así, las leyes de los juegos malabares son exactamente las mismas en el sistema de referencia en reposo en el terreno y en el sistema de referencia que viaja con el tren que se mueve uniformemente. Es imposible detectar el movimiento del tren mediante un experimento hecho enteramente dentro del vagón. Sólo mirando por la ventanilla es uno capaz de decir que el tren se está moviendo con respecto al suelo, e incluso entonces, no se puede decir si es el tren o el suelo el que se está moviendo. Todo movimiento es relativo». Sorprendido, el malabarista recoge sus bolas y continúa practicado.

Todo movimiento es relativo. El movimiento de un vagón con una velocidad de 150 kilómetros por hora, el movimiento de la Tierra alrededor del Sol a 30 kilómetros por segundo, y el movimiento del sistema solar alrededor de la galaxia a 200 kilómetros por segundo —todos estos son indetectables siempre que sean uniformes.

¿Uniformes? ¿Qué significa esto? Consideremos al malabarista cuando el tren se pone en marcha. De repente, hay una sacudida hacia adelante. No sólo las bolas se quedan rezagadas sino que el propio lanzador está a punto de perder el equilibrio. Cuando el tren se para, sucede algo similar. O supongamos que el tren toma una curva cerrada. Por supuesto, en todas estas situaciones las reglas del lanzamiento requerirán una modificación. ¿Cuál es el nuevo ingrediente? La respuesta es la *aceleración*.

Acercación significa cambio en la velocidad. Cuando el vagón se pone en marcha, y cuando frena bruscamente, la velocidad cambia y hay aceleración. ¿Qué pasa cuando toma una curva? Quizá sea menos obvio, pero en cualquier caso es cierto que la velocidad está cambiando —no la magnitud de la velocidad, sino su dirección. Para un físico, cualquier cambio en la velocidad se llama aceleración, ya sea en magnitud o en dirección. Por consiguiente, el Principio de Relatividad tiene que afinarse:

Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia que se mueven con movimiento uniforme (sin aceleración) unos con respecto a otros.

El Principio de Relatividad fue formulado inicialmente unos 250 años antes de que naciera Einstein. Entonces, ¿por qué es Einstein tan famoso? Lo es porque puso de manifiesto el conflicto aparente entre el Principio de Relatividad y otro principio de la física, un principio que podríamos llamar Principio de Maxwell. Como se ha discutido en los capítulos 2 y 4, James Clerk Maxwell descubrió la

moderna teoría del electromagnetismo, la teoría de todas las fuerzas eléctricas y magnéticas en la Naturaleza. El mayor descubrimiento de Maxwell fue desvelar el gran misterio de la luz. La luz, argumentaba, consiste en ondas de perturbaciones eléctricas y magnéticas que se mueven a través del espacio como las olas a través del mar. Pero para nosotros, lo más importante que demostró Maxwell es que la luz que se mueve a través del espacio vacío siempre se mueve a exactamente la misma velocidad: 300 000 kilómetros por segundo, aproximadamente⁵⁵. Eso es lo que yo llamo Principio de Maxwell:

La luz que se mueve en el espacio vacío, independientemente de cómo fue creada, lo hace siempre a la misma velocidad.

Pero ahora tenemos un problema: una grave colisión entre dos principios. Einstein no fue el primero en preocuparse por el choque entre el Principio de Relatividad y el Principio de Maxwell, pero él vio el problema con mayor claridad. Y mientras otros estaban desconcertados por los datos experimentales, Einstein —maestro del experimento mental— estaba preocupado por un experimento que tuvo lugar dentro de su cabeza. Según sus propias memorias, en 1895, cuando tenía dieciséis años, Einstein pensó la siguiente paradoja. Se imaginó a sí mismo en un vagón de ferrocarril moviéndose a la velocidad de la luz y observando una onda luminosa que se movía a su lado en la misma dirección. ¿No vería el rayo de luz en reposo?

⁵⁵ Cuando la luz se mueve a través del agua o el vidrio, se mueve algo más lenta.

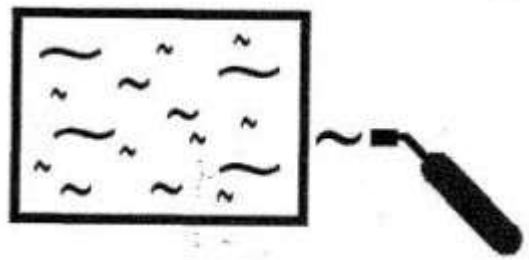
No había helicópteros en los días de Einstein, pero podríamos imaginarle encima del mar, moviéndose exactamente con la velocidad de las ondas del océano. Las ondas parecerían estar en reposo. De la misma forma, razonaba el joven de dieciséis años, un pasajero en el vagón (recordemos que se está moviendo con la velocidad de la luz) detectaría una onda luminosa completamente inmóvil. Ya a esa temprana edad Einstein sabía lo suficiente sobre la teoría de Maxwell para darse cuenta de que lo que estaba imaginando era imposible; el Principio de Maxwell afirmaba que la luz se mueve siempre a la misma velocidad. Si las leyes de la Naturaleza son las mismas en todos los sistemas de referencia, entonces el Principio de Maxwell tendría que aplicarse en el tren en movimiento. El Principio de Maxwell y el Principio de Relatividad de Galileo y Newton iban a chocar.

Einstein se rascó ese picor durante una década antes de ver una salida. En 1905 escribió su famoso artículo «Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento», en el que postulaba una teoría completamente nueva del espacio y el tiempo: la teoría de la relatividad especial. La nueva teoría cambiaba radicalmente los conceptos de longitud y duración (de tiempo), y en especial lo que significa que dos sucesos sean simultáneos.

Al mismo tiempo que estaba ideando la Relatividad Especial, Einstein estaba intrigado por otra paradoja. A principios del siglo XX los físicos estaban muy desconcertados por la radiación de cuerpo negro. Recuerde que en el capítulo 9 expliqué que la radiación de cuerpo negro es la energía electromagnética que

produce un objeto caliente que resplandece. Imaginemos un recipiente cerrado completamente vacío en el cero absoluto. El interior del recipiente es un vacío perfecto. Calentemos ahora el recipiente desde fuera. Las paredes exteriores empiezan a irradiar radiación de cuerpo negro, y también lo hacen las paredes interiores. La radiación de las paredes interiores va al espacio vacío dentro del recipiente y lo llena de radiación de cuerpo negro. Ondas electromagnéticas de todas las diferentes longitudes de onda se agitan, rebotando en las paredes interiores: luz roja, luz azul, infrarroja y todos los colores del espectro.

Según la física clásica, cada longitud de onda —microondas; infrarrojo; rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y ondas ultravioletas— debería



aportar la misma cantidad de energía. Pero ¿por qué detenerse aquí? Longitudes de onda aún más cortas —rayos X, rayos gamma y longitudes de onda cada vez menores— también deberían aportar la misma cantidad de energía. Puesto que no hay límite a cuan corta puede ser una longitud de onda, la física clásica predecía una cantidad de energía infinita en el recipiente. Esto era un absurdo manifiesto. Toda esa energía vaporizaría al instante el recipiente, pero ¿qué estaba mal exactamente?

El problema al que esto llevaba era tan grave que a finales del siglo XIX se llegó a conocer como la *catástrofe ultravioleta*. Una vez más, el problema era el resultado de un choque entre principios

profundamente aceptados, ambos difíciles de abandonar. Por un lado, la teoría ondulatoria era increíblemente acertada para explicar las propiedades bien conocidas de la luz, tales como la difracción, la refracción, la reflexión y, la más impresionante, la interferencia. Nadie estaba dispuesto a abandonar la teoría ondulatoria, pero por otro lado, el principio de que cada longitud de onda debería tener la misma energía, llamado principio de equipartición, se seguía de los aspectos más generales de la teoría del calor: en particular, que el calor es un movimiento aleatorio.

En 1900 Max Planck aportó algunas ideas muy importantes que estaban cerca de resolver el dilema. Pero fue Einstein, en 1905, quien encontró la respuesta correcta. Sin dudarlo, el desconocido funcionario de la oficina de patentes hizo algo increíblemente atrevido. La luz, decía, no es un flujo continuo de energía como imaginaba Maxwell. Está compuesta de partículas de energía indivisibles, o cuantos, más tarde llamados *fotones*. Uno sólo puede maravillarse ante la extraordinaria arrogancia del hombre que dijo a los mayores científicos del mundo que todo lo que sabían de la luz estaba equivocado.

La hipótesis de que la luz está compuesta de fotones indivisibles cuya energía es proporcional a su frecuencia resolvía el problema. Aplicando la mecánica estadística de Boltzmann a dichos fotones, Einstein encontró que para longitudes de onda muy cortas (alta frecuencia), hay menos de un fotón. Menos que uno significa ninguno. De modo que las longitudes de onda muy cortas no llevan energía, y la catástrofe ultravioleta dejaba de existir. Pero no era

éste el final de la discusión. Pasarían casi treinta años antes de que Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger y Paul Dirac reconciliaran los fotones de Einstein con las ondas de Maxwell. Pero la ruptura de Einstein abrió la puerta.

La teoría de la relatividad general, la mayor obra maestra de Einstein, también nació a partir de un simple experimento mental sobre un conflicto de principios. El experimento mental era tan simple que un niño podría haberlo realizado. Todo lo que implicaba era la observación cotidiana de que cuando un tren acelera partiendo del reposo, los pasajeros se sienten empujados contra sus asientos, como si el vagón se hubiera levantado hacia arriba de modo que la gravedad los atrajera hacia la parte trasera del mismo. Entonces, ¿cómo podemos decir que un sistema de referencia está acelerado? ¿Acelerado con respecto a qué?

Respuesta de Einstein tal como la transmitiría el payaso: *no podemos decirlo*. «¿Qué?», dice el malabarista. «Por supuesto que podemos. ¿No acabas de decirme que te sentiste presionado contra el respaldo de tu asiento?». «Sí», responde el payaso, «exactamente como si alguien hubiera inclinado el vagón de modo que la gravedad tirase de ti hacia atrás». Einstein captó esa idea: es imposible revelar la aceleración a partir del efecto de la gravedad. El pasajero no tiene forma de saber si el tren se está poniendo en marcha o si la gravedad está tirando de él hacia el respaldo de su asiento. De la paradoja y la contradicción nació el principio de equivalencia:

Los efectos de la gravedad y de la aceleración son indistinguibles. El efecto de la gravedad en cualquier sistema físico es exactamente el mismo que el efecto de la aceleración.

Una y otra vez vemos la misma pauta. A riesgo de enfatizar el punto, los mayores avances en física han sido revelados por experimentos mentales que ponían de manifiesto un choque entre principios profundamente arraigados. A este respecto, el presente no es diferente del pasado.

El choque

Volvamos a la pregunta original planteada al principio de este capítulo: ¿por qué debería importarnos que la información se pierda en la evaporación de un agujero negro?

En los días y semanas posteriores a la reunión en el ático de Werner Erhard, caí en la cuenta de que Stephen Hawking había puesto el dedo en un choque de principios que rivalizaba con las grandes paradojas del pasado. Algo estaba seriamente equivocado en nuestros conceptos más básicos de espacio y tiempo. Era obvio —lo había dicho el propio Hawking— que el principio de equivalencia y la mecánica cuántica estaban a punto de colisionar. La paradoja podía destruir toda la estructura, pero reconciliar las dos podría aportar nuevas y profundas intuiciones a ambas.

El choque me provocó un prurito insoportable, pero no era muy contagioso. Stephen parecía satisfecho con la conclusión de que la información se pierde, y pocos parecían preocuparse mucho por la

paradoja. Durante más de una década, de 1981 a 1993, esta complacencia me molestó mucho. No podía entender cómo alguien —sobre todo Stephen— podía dejar de ver que reconciliar los principios de la mecánica cuántica con los de la relatividad era el gran problema de nuestra generación, la gran oportunidad de igualar los logros de Planck, Einstein, Heisenberg y los otros héroes del pasado. Pensaba que Stephen era obtuso al dejar de ver la profundidad de su propia pregunta. Se convirtió en una especie de obsesión convencer a Stephen y a los demás (pero sobre todo a Stephen) de que la clave no estaba en abandonar la mecánica cuántica sino en reconciliarla con la teoría de los agujeros negros. Para mí es obvio —y estoy seguro de que Stephen, Gerard 't Hooft, John Wheeler y prácticamente cualquier relativista, teórico de cuerdas y cosmólogo que yo conozca estaría de acuerdo— que tener dos teorías incompatibles de la Naturaleza es intelectualmente intolerable y que la teoría de la relatividad general debe hacerse compatible con la mecánica cuántica. Pero a los físicos teóricos les gusta la polémica⁵⁶.

⁵⁶ Recientemente me sorprendió mucho descubrir que no todos están de acuerdo. En una reseña del libro de Brian Greene, *El tejido del cosmos*, Freeman Dyson hacía una notable declaración: «Como conservador, yo no estoy de acuerdo en que la división de la física en teorías separadas para lo grande y lo pequeño sea inaceptable. Yo estoy cómodo con la situación en la que hemos vivido los últimos 80 años, con teorías separadas para el mundo clásico de estrellas y planetas y el mundo cuántico de átomos y electrones». ¿Qué podía estar pensando Dyson? ¿Que como los antiguos, antes de Galileo, deberíamos aceptar dos teorías de la Naturaleza con diferencias insalvables? ¿Es eso conservador? ¿O es reaccionario? Para mí, es simplemente indiferente.

Capítulo 13

Jaque ahogado

Cuando yo era joven y la gente —en fiestas o reuniones sociales— me preguntaba a qué me dedicaba, yo me negaba a hablar de ello. No es que estuviera avergonzado o molesto; simplemente era difícil de explicar. Así que para evitar el tema, decía: «Soy un físico nuclear, pero no puedo hablar de ello». Funcionó durante los años sesenta y los setenta, pero no ahora que ha terminado la guerra fría. Sigo teniendo algún problema con la pregunta, aunque por una razón diferente: yo no sé exactamente cuál es la respuesta. La contestación obvia, «Soy un físico teórico», lleva habitualmente a otra pregunta, «¿Qué tipo de física haces?». En ese punto me quedo atascado. Podría decir que soy un físico de partículas elementales, pero también he trabajado en cosas grandes tales como agujeros negros y el universo entero. Podría decir que soy un físico de altas energías, pero a veces trabajo con las energías más bajas, e incluso las propiedades del espacio vacío. No hay un nombre adecuado para eso en lo que yo y muchos de mis amigos estamos interesados. Ser calificado como un teórico de cuerdas me irrita; no me gusta ser clasificado de una forma tan rígida. Me gustaría decir que trabajo en las leyes fundamentales de la Naturaleza, pero eso suena pretencioso, de modo que normalmente mi respuesta es que soy un físico teórico y he trabajado en muchas cosas.

De hecho, antes de principios de los años ochenta la mayor parte de las cosas que había hecho podían llamarse legítimamente física de

partículas elementales. Aproximadamente en esa época, sin embargo, el campo empezó a estancarse. El modelo estándar estaba prácticamente terminado, y se habían desarrollado sus variantes más interesantes. Sólo había que esperar —y esperar mucho tiempo— a que pudieran construirse aceleradores para poner a prueba dichas variantes. Así que lo cierto es que yo estaba un poco aburrido y decidí ver qué podía descubrir sobre la gravedad cuántica. Al cabo de algunos meses empecé a pensar que Feynman tenía razón: la gravedad cuántica era demasiado remota; parecía que no había forma de hacer progresos. Ni siquiera estaba claro para mí qué problemas había. John Wheeler, a su inimitable manera, había dicho, «La pregunta es: ¿cuál es la pregunta?». Y ciertamente yo no veía la respuesta. Estaba a punto de volver a la física de partículas convencional cuando, de repente, Stephen dejó caer la bomba que respondía al interrogante de Wheeler: la pregunta es «¿Cómo salvamos la física de la anarquía de la pérdida de información?».

Si en ese momento la física de partículas estaba estancada, también lo estaba la teoría cuántica de los agujeros negros, y así siguió durante unos nueve años. Ni siquiera Hawking publicó nada sobre agujeros negros durante los años que van de 1981 a 1989. Yo sólo he sido capaz de encontrar ocho artículos en revistas de ese período que aborden la cuestión de la pérdida de información en agujeros negros. Yo escribí uno de ellos, y 't Hooft escribió todos los demás, donde expresaba básicamente su fe en la matriz-S antes que en la matriz- \mathcal{S} de Hawking.

La razón de que yo no publicase casi nada sobre agujeros negros durante los nueve años posteriores a 1981 era sencillamente que no podía encontrar ninguna manera de resolver el enigma. Durante esa época me encontré haciendo círculos, planteando las mismas preguntas una y otra vez, y tropezando con los mismos obstáculos impenetrables. La lógica de Hawking era muy clara: el horizonte es meramente un punto de no retorno, y nada que lo cruce puede volver. El razonamiento era convincente, pero la conclusión era absurda.

He aquí cómo expliqué el problema en una conferencia ante un grupo de aficionados a la física y estudiantes de astronomía en San Francisco en algún momento de 1988⁵⁷.

Paradoja del agujero negro muy grande: una conferencia en San Francisco

Quiero llamar su atención sobre un serio conflicto de principios que fue descrito por primera vez por Stephen Hawking hace trece años. Mi razón para exponerlo es que señala una crisis muy seria que necesita ser resuelta antes de que podamos tener esperanzas de entender las cuestiones más profundas de la física y la cosmología. Estas cuestiones implican a la gravedad por una parte y a la teoría cuántica por la otra.

⁵⁷ Lo que sigue es una reconstrucción aproximada de la conferencia basada en las notas que aún conservo. Me he tomado algunas libertades para reemplazar las ecuaciones por palabras. La historia «No olvide tomar sus píldoras antigravedad» estaba pensada para una revista de divulgación científica. Nunca la terminé, pero en forma abreviada era parte de la conferencia de San Francisco.

¿Por qué, se preguntarán ustedes, necesitamos mezclar estos dos dominios de experiencia? Después de todo, la gravedad trata con lo muy grande y muy pesado, mientras que la mecánica cuántica gobierna el mundo de lo muy pequeño y ligero. Nada es a la vez pesado y ligero, de modo que ¿cómo pueden ambas teorías ser importantes en el mismo contexto?

Empecemos con las partículas elementales. Como todos ustedes saben, la fuerza gravitatoria entre los electrones y el núcleo atómico son increíblemente débiles comparadas con las fuerzas eléctricas que mantienen unido el átomo. Lo mismo es cierto, más incluso, para las fuerzas nucleares que mantienen los quarks unidos en un protón. De hecho, la fuerza gravitatoria es un millón de trillones de trillones de veces más débil que las fuerzas habituales. Por ello, es evidente que la gravedad no desempeña ningún papel importante en física atómica o nuclear; pero ¿qué pasa con las partículas elementales?

Normalmente pensamos en las partículas tales como el electrón como si fueran puntos espaciales infinitamente pequeños. Pero eso no puede ser toda la verdad. La razón es que las partículas elementales tienen muchas propiedades que las hacen diferentes unas de otras. Algunas tienen carga eléctrica, mientras que otras no la tienen. Los quarks tienen propiedades con nombres tales como *número bariónico*, *isospín* y el equívoco nombre *color*. Las partículas giran como peonzas alrededor de un eje. Es poco razonable pensar que un mero punto pudiera tener tanta estructura y variedad. La mayoría de los físicos de partículas creemos que si pudiéramos

examinar las partículas en una escala increíblemente pequeña, empezaríamos a ver la maquinaria oculta que las hace marchar.

Si es realmente cierto que los electrones y sus diversos parientes no son infinitamente pequeños, ellos deben tener algún tamaño. Pero todo lo que sabemos realmente por observación directa (haciendo chocar unos con otros) es que no son mayores que aproximadamente una diezmilésima del tamaño de un núcleo atómico.

Pero están sucediendo cosas extraordinarias. En años recientes hemos estado acumulando pruebas indirectas de que la maquinaria en el interior de las partículas no es mucho más grande, ni mucho más pequeña, que la longitud de Planck. Ahora bien, la longitud de Planck tiene un significado muy especial para un físico teórico. Estamos habituados a considerar la gravedad tan débil comparada con las fuerzas eléctricas y subnucleares que resulta completamente irrelevante para el comportamiento de las partículas elementales, pero no es así cuando fragmentos de materia se aproximan a menos de una distancia de Planck. En este momento, la gravedad no sólo se ha hecho tan fuerte como las otras fuerzas sino incluso más.

Lo que todo esto significa es que en lo más profundo del mundo — distancias tan pequeñas que incluso los electrones son estructuras complicadas— la gravedad puede ser la fuerza más importante que mantiene unidas a las partículas. Así que, ya ven, gravedad y mecánica cuántica pueden unirse en la escala de Planck y explicar las propiedades de los electrones, quarks, fotones y todos sus

amigos. Los físicos de partículas elementales tendríamos que ocuparnos más de la gravedad cuántica.

También los cosmólogos pueden evitar una teoría cuántica de la gravedad, pero sólo hasta cierto punto. A medida que nos remontamos en el pasado del universo, sabemos que las partículas estaban más densamente empaquetadas. Hoy [1988] los fotones que constituyen la CMB⁵⁸ están separados un centímetro, pero cuando fueron emitidos por primera vez, estaban mil veces más juntos. Conforme nos remontamos hacia atrás, las partículas estaban empaquetadas como sardinas en una lata cada vez más pequeña. Parece probable que en el momento del *Big Bang* su separación no fuera mayor que una distancia de Planck. Si es así, las partículas estaban tan juntas que las fuerzas más importantes entre ellas eran las gravitatorias. En otras palabras, las mismas fuerzas de gravedad cuánticas que tienen la clave para las partículas elementales pueden ser también las principales fuerzas responsables del *Big Bang*.

Por lo tanto, dado que la gravedad cuántica es importante para nuestro futuro (y nuestro pasado), ¿qué sabemos sobre ella? No mucho, aparte de que la teoría cuántica y la gravedad colisionan, especialmente en lo que respecta a los agujeros negros. Eso es bueno, porque significa que tenemos una oportunidad de aprender cosas importantes si resolvemos ese choque. Hoy voy a contarles

⁵⁸ Cosmic Microwave Background (Radiación Cósmica de Fondo de Microondas): la radiación que fue emitida originalmente en el *Big Bang*.

una breve historia que ilustra el problema; no la solución, sólo el problema.

No olvide tomar sus píldoras antigraedad

Año 8419677599

Hace tiempo que la Tierra se escapó de su órbita alrededor de la estrella Sol ahora muerta. Después de deambular durante incontables generaciones, encuentra su lugar en una órbita en torno a un agujero negro gigante en algún lugar en el Supercúmulo Coma. Todo el planeta ha estado gobernado por la misma corporación desde finales del siglo XXI, cuando un golpe incruento dejó todo el poder en manos de la industria farmacéutica.

«Sí, Conde Geritol, ¿qué pasa ahora? Usted ha estado prometiendo acción durante los cinco últimos años. ¿Está haciéndome perder el tiempo con otro informe de “progreso”?».

«Por favor, Su Alteza Real, este gusano ínfimo e indigno pide su perdón real por su imperdonable estupidez, pero esta vez tengo noticias realmente buenas. ¡Lo hemos cogido!».

Su Alteza Real, el Emperador Merck LLXXXVI, frunce el ceño por un momento. Luego, volviendo su enorme cabeza calva hacia el conde —Ministro de Generación de Falsa Información y Cumplimiento de Ciencia Antirracional— lo clava en la pared con su mirada penetrante. «Loco. ¿A quién ha cogido? ¿A un bacalao?».

—No, Excelencia. Es al hereje, el Gran Uno. Atrapamos a ese hijo de físico mugriento resuelve-ecuaciones, el que ha estado infectando a nuestra gente con feos rumores de que las píldoras antigraedad

son fraudulentas. Precisamente ahora está encadenado a la pared de la antecámara. ¿Le traigo aquí? —El conde inclina su rostro de rata con una sonrisa adulatora—. Apuesto a que podría utilizar un Valium ahora. Ja, ja.

Una sonrisa cruza brevemente el rostro de Su Alteza Real: «Traed al perro».

El prisionero, andrajoso y magullado, pero inquebrantable, es brutalmente lanzado al suelo a los pies de Geritol. «¿Cuál es tu nombre, perro, y de qué familia procedes?». Poniéndose en pie y sacudiendo desafiante el polvo de su túnica, el prisionero mira fijamente a su acusador y responde orgullosamente, «Mi nombre es Steve⁵⁹». Tras una pausa larga y desafiante —demasiado larga para el gusto del conde— continúa. «Desciendo de un antiguo linaje que tiene sus raíces en la guerra de los agujeros negros. Mi ancestro era Stephen el Atrevido, de Cambridge».

Por un momento, las facciones del emperador muestran cierta irritación, pero recupera su compostura y sonrío. «Bien, Steve —supongo que doctor es el título apropiado— mira donde tu antiguo linaje te ha llevado ahora. Tu existencia me ofende. La única cuestión es cómo eliminar tu presencia».

Más tarde, cuando el Sol artificial se pone en el oeste, Steven recibe su última comida. Como para burlarse de él, el emperador ha enviado los bocados más escogidos de su propia mesa, junto con un

⁵⁹ A finales del siglo XX, una buena fracción de los grandes físicos del mundo se llamaba Steve. Steve Weinberg, Steve Hawking, Steve Shenker, Steve Giddings y Steve Chu estaban entre los muchos Steve de la física. A finales del siglo XXI, los que aspiraban a ser padres de grandes físicos empezaron a llamar a sus hijos (hembras tanto como varones) Steve.

mensaje de «simpatía». Con la cabeza hundida, el apesadumbrado guardián de la prisión (Steve era muy estimado por el personal de la prisión) lee el mensaje. Para el guardián parecen las peores noticias posibles: «Mañana a primera hora, tú, tu familia y todos tus amigos herejes seréis introducidos en un pequeño planeta habitable y luego arrojados directamente al abismo, las fauces gigantes del fuego y calor oscuro que rodea al agujero negro. Primero, te sentirás incómodamente caliente. Pronto tu carne se cocerá y tu sangre hervirá. Tus fragmentos se revolverán hasta que se evaporen, desperdigados irreversiblemente en los cielos». Sin ningún motivo aparente, las facciones de Steve se relajan en una sonrisa. «Extraña reacción ante las malas noticias», piensa el guardián de la prisión.

El emperador y el conde se levantan temprano al día siguiente. El emperador está amable, casi jovial. «Hoy será divertido. ¿No piensa así, Conde?». «¡Oh!, sí, Su Excelencia. He anunciado la ejecución. El pueblo encontrará muy entretenido observar a través de sus telescopios cómo empieza a hervir la sangre del hereje».

Ansioso de la aprobación del emperador, el conde adulador sugiere una última y rápida comprobación de la temperatura del agujero negro. «Sí, ministro, hágalo. Desde esta distancia el horizonte parece frío, pero haga bajar un termómetro colgado de un cable hasta la superficie y registre la temperatura cerca del horizonte. Por supuesto, eso se ha hecho muchas veces, pero disfrutaré viendo cómo sube el mercurio». Y así, un pequeño cohete está dispuesto para llevar el termómetro lejos de la Tierra. Una vez superada la

atracción gravitatoria de la Tierra, el termómetro cae hacia el horizonte, tirando del cable que hay tras él.

El termómetro desciende hasta que el cable se tensa. «Cálido, pero no ardiente. Bájelo un poco más, conde», ordena el emperador. Un poco más de cable sale lentamente de la bobina. A través del telescopio, el emperador observa cómo sube el mercurio —pasado el punto de ebullición del agua, pasado el punto de evaporación del vidrio y el mercurio— hasta que el termómetro se vaporiza. «¿Suficientemente caliente para usted, Su Alteza?», pregunta el conde. «Querrá usted decir suficientemente caliente para Steve, conde. Sí, creo que el clima será perfecto. Vamos. Es hora de empezar la ejecución».

Poco tiempo después, un segundo cohete, esta vez suficientemente grande para doscientas personas, está preparado para transportar a los infortunados herejes de la ciencia racional hasta un satélite pequeño pero hospitalario. La mujer de Steve, que llora desesperadamente, se mantiene cogida de su brazo. El físico desea explicar la verdad, pero todavía es pronto. Los guardianes del emperador les rodean.

Algunas horas más tarde, el propio conde presiona el botón que activa los cohetes gigantes que sacan al pequeño satélite azul verdoso de su órbita alrededor de la Tierra. Con doscientos pasajeros aterrorizados (los guardianes ya no están con ellos), la colonia inicia su inmersión hacia el fuego oscuro.

«Puedo verlos, conde», observa el emperador. «El calor empieza a afectarles. Se están aletargando y se mueven lentos. Muy

leeeentooooos». La cúpula del observatorio es grande, y el ocular del telescopio está situado en una posición muy precaria. El conde sonríe, saca una píldora antigraavedad y se la ofrece al emperador. «Por seguridad, Su Alteza. La caída desde aquí sería muy desagradable». Su Excelencia traga la píldora y mira de nuevo por el ocular. «Aún puedo verlos. Pero, mire, están empezando a caer en el horizonte estirado. Ahora mis leales súbditos verán cómo se revuelven mis enemigos. Mire, sus fragmentos individuales se están fusionando poco a poco en la sopa densa y caliente. Y uno a uno, están siendo extraídos en fotones. Contémoslos y asegurémonos de que se han vaporizado por completo».

Ellos observan cómo los fotones son registrados y analizados uno a uno en el banco gigante de computadoras del telescopio.

«Ja», dice el conde. «Es tal como predicen los principios de la mecánica cuántica. Se ha registrado cada bit de información. Pero están revueltos hasta ser irreconocibles. Nadie va a recomponer de nuevo a Humpty-Dumpty».

El emperador pone su brazo en los hombros del conde y dice, «Enhorabuena, conde. Un trabajo matutino muy provechoso. Pero el gesto despreocupado afecta a su equilibrio. Cien metros más abajo, el conde se pregunta de repente si los rumores sobre las píldoras antigraavedad podrían no ser ciertos después de todo».

Steve estudia su cuaderno con concentración. Luego levanta la vista contento y abraza a su mujer: «Querida, pronto habremos atravesado el horizonte a salvo». La señora Steve y los demás están claramente intrigados mientras Steve continúa: «No hay peligro en el

horizonte. Es simplemente un punto de no retorno inocuo». Y añade: «Por suerte, estaremos en caída libre, y nuestra aceleración cancelará exactamente los efectos de la gravedad del agujero negro. No sentiremos nada mientras atravesemos el horizonte». Su mujer es aún escéptica: «Bueno, incluso si el horizonte es inocuo, yo he oído cosas terribles sobre una singularidad inevitable dentro del agujero negro. ¿Seremos aplastados y destrozados en pedazos?». «Sí, eso es verdad», responde él. «Pero este agujero negro es tan grande que pasará un millón de años antes de que nuestro planeta se acerque a la singularidad».

Y así cruzaron felizmente el horizonte... al menos si ustedes creen en el principio de equivalencia.

El final: Hay muchas cosas erróneas en esta historia, aparte de su mérito literario. Entre otras cosas, si un agujero negro fuera suficientemente grande para que Steve y sus seguidores pudieran sobrevivir muchos años antes de llegar a la singularidad⁶⁰, se necesitarían también muchos años para que el termómetro del conde bajara hasta su destino. Y mucho peor, el tiempo necesario para que el agujero negro emita los bits de información que Steve y sus seguidores contenían originalmente sería increíblemente largo, mucho mayor que la edad del universo. Pero si ignoramos estos detalles numéricos, el argumento básico de la historia tiene sentido. ¿O no es así?

⁶⁰ La que, al estar al otro lado del horizonte, nunca podrían ver el emperador y el conde.

¿Fue Steve inmolado en el horizonte? El conde y el emperador contaron cada bit, y todos estaban en los productos de la evaporación, «tal como predicen los principios de la mecánica cuántica». De modo que Steve fue destruido cuando se aproximó al horizonte. Pero la historia afirma también que Steven pasó sano y salvo al otro lado sin ningún daño para él ni para su familia —tal como predice el principio de equivalencia—.

Evidentemente, tenemos un choque de principios. La mecánica cuántica implica que todos los objetos encuentran una región supercaliente justo por encima del horizonte, donde la temperatura extrema convierte toda la materia en fotones disociados y los irradia de nuevo fuera del agujero negro como luz procedente del Sol. Al final, cada bit de información transportado por la materia que cae debe estar incluido en estos fotones.

Pero parece que el principio de equivalencia tiene una historia diferente y contradictoria que contar.

Seminario interrumpido

Déjeme interrumpir el curso del seminario de 1988 para clarificar algunos puntos, que muchos de los entusiastas de la física que había en la audiencia conocían pero quizá usted no. En primer lugar, ¿por qué el principio de equivalencia hacía confiar a los exilados en que el horizonte era un ambiente seguro? Un experimento mental que mencioné en el capítulo 2 nos será de ayuda. Imaginemos la vida en un ascensor, pero en un mundo en donde la gravedad es mucho más intensa que en la superficie de la

Tierra. Si el ascensor está en reposo, los pasajeros sienten toda la fuerza de la gravedad en las plantas de los pies y en cualquier otra parte de sus cuerpos estrujados. Supongamos que el ascensor empieza a subir. La aceleración hacia arriba empeora las cosas. Según el principio de equivalencia, la aceleración añade un componente adicional a la gravedad que experimentan los pasajeros.

Pero ¿qué pasa si se rompe el cable y el ascensor empieza a acelerarse hacia abajo? Entonces el ascensor y los pasajeros están en caída libre. Los efectos de la gravedad y de la aceleración hacia abajo se cancelan exactamente, y los pasajeros no pueden decir que están en un intenso campo gravitatorio —al menos no hasta que dan con el suelo y experimentan una violenta aceleración hacia arriba.

De la misma forma, los exiliados en su planeta en caída libre no deberían experimentar ningún efecto de la gravedad del agujero negro en el horizonte. Son como los renacuajos que se encuentran en arrastre libre en el capítulo 2 cuando atraviesan sin saberlo el punto de no retorno.

El segundo punto es menos familiar. Como he explicado, la temperatura de Hawking de un agujero negro grande es extraordinariamente pequeña. Entonces, ¿por qué el conde y el emperador detectan una temperatura tan alta cerca del horizonte cuando bajan su termómetro? Para entender este punto, tenemos que saber qué le sucede a un fotón cuando se mueve hacia arriba en un potente campo gravitatorio. Pero empecemos con algo más

familiar, una piedra arrojada verticalmente hacia arriba desde la superficie de la Tierra. Si no es arrojada con una velocidad inicial suficiente, caerá de nuevo a la superficie. Pero si se le da la energía cinética suficiente, la piedra escapará de los confines de la Tierra. Sin embargo, incluso si la piedra consigue escapar, se estará moviendo con una energía cinética mucho menor que cuando empezó. O, dicho de otra manera, la piedra tenía una energía cinética mucho mayor cuando empezó que cuando escapó finalmente.

Todos los fotones se mueven con la velocidad de la luz, pero eso no significa que todos tengan la misma energía cinética. De hecho, se parecen mucho a la piedra. Cuando escapan de un campo gravitatorio, pierden energía; cuanto más fuerte es la gravedad que tienen que superar, mayor es la pérdida de energía. Para cuando un rayo gamma asciende desde la cercanía del horizonte, su energía ha disminuido tanto que ahora es una radioonda de muy baja energía. Recíprocamente, una onda de radio observada lejos del agujero negro debe haber sido un rayo gamma de muy alta energía cuando dejó el horizonte.

Consideremos ahora al conde y al emperador muy por encima del agujero negro. La temperatura de Hawking es tan baja que los fotones de una onda de radio tienen muy poca energía. Pero con un poco de reflexión, el conde y el emperador se habrían dado cuenta de que los mismos fotones debían haber sido rayos gamma de energía superalta cuando fueron emitidos cerca del horizonte. Eso es lo mismo que decir que hacía más calor allí. De hecho, la

gravidad es tan fuerte en el horizonte de un agujero negro que los fotones procedentes de dicha región tendrían que tener una enorme energía para escapar. Visto desde lejos, el agujero negro puede estar muy frío, pero de cerca el termómetro estaría bombardeado por fotones tremendamente energéticos. Por eso es por lo que los ejecutores estaban seguros de que sus víctimas se vaporizarían en el horizonte.

Seminario reanudado

Parece que hemos llegado a una contradicción. Un conjunto de principios —relatividad general y el principio de equivalencia— dice que la información viaja ininterrumpida a través del horizonte. Otro, la mecánica cuántica, nos lleva a la conclusión opuesta: los fragmentos que caen, aunque terriblemente revueltos, son devueltos con el tiempo en forma de fotones y otras partículas.

Ahora, podría preguntar usted, ¿cómo sabemos que los bits, después de caer a través del horizonte pero antes de dar con la singularidad, no pueden hacer su camino de vuelta en la radiación de Hawking? La respuesta es obvia: para hacerlo tendrían que superar la velocidad de la luz.

Le he presentado una potente paradoja y le he dicho por qué puede ser muy importante para el futuro de la física. Pero no le he dado ninguna pista de una posible escapatoria al dilema. La razón es que no conozco la solución. Pero tengo prejuicios, así que déjeme decirle cuáles son.

Yo no creo que tengamos que abandonar los principios de la mecánica cuántica ni los de la teoría de la relatividad general. En particular, yo, como Gerard 't Hooft, creo que no hay pérdida de información en la evaporación de un agujero negro. De algún modo estamos pasando por alto un punto muy profundo sobre la información y cómo está localizada en el espacio.

Esa conferencia en San Francisco fue la primera de muchas conferencias similares que di en departamentos de física y congresos de física en los cinco continentes. Yo había decidido que incluso si no podía resolver el rompecabezas, me convertiría en un apóstol de su importancia.

Recuerdo una conferencia particularmente bien. Fue en la Universidad de Texas, uno de los principales departamentos de física en Estados Unidos. Entre la audiencia se encontraban algunos físicos extraordinariamente dotados, incluidos Steven Weinberg, Willy Fischler, Joe Polchinski, Bryce DeWitt y Claudio Teitelboim. Todos ellos habían hecho contribuciones importantes a la teoría de la gravedad. Yo estaba muy interesado en sus opiniones, de modo que al final de la conferencia hice una encuesta entre la audiencia. Si la memoria no me falla, Fischler, DeWitt y Teitelboim mantenían la opinión minoritaria, según la cual la información no se pierde. Polchinski estaba convencido por los argumentos de Hawking y votó con la mayoría. Weinberg se abstuvo. El voto global fue de tres a uno a favor de Hawking, pero había una notable renuencia a comprometerse por parte de los miembros de la audiencia.

Durante el jaque ahogado, los caminos de Stephen y los míos se cruzaron varias veces. De todos estos encuentros, sobresale el que tuvo lugar en Aspen.

Capítulo 14

Escaramuza en Aspen

Antes del verano de 1964, yo no había visto nunca una montaña más alta que el poderoso Monte Minnewaska (que tiene unos 1000 metros) en las Montañas Catskill. Aspen, Colorado, era para mí un extraño y mágico reino montañoso cuando lo vi por primera vez siendo un estudiante graduado de veinticuatro años. Los picos altos y cubiertos de nieve que rodean la ciudad le daban una sensación agreste y ultramundana, especialmente para un muchacho de ciudad como yo. Aunque ya era un centro popular de esquí, Aspen aún conservaba cierto sabor de frontera de los días de la minería de plata de finales del siglo XIX. Las calles no estaban pavimentadas, y en junio los turistas eran tan escasos que uno podía albergarse casi en cualquier parte en las afueras de la ciudad. Era un lugar de personajes extravagantes. En cualquiera de los bares locales, uno podía sentarse entre un genuino vaquero americano y un montañero rudo y sin afeitar. O podría encontrarse entre un pescador desaseado y un pastor de ovejas polaco. También podría entablar conversación con un miembro de la élite de poder de los negocios americanos, la concertina de la orquesta de estudiantes de Berkeley o con un físico teórico.

Enclavado en el extremo oeste de la ciudad, entre la Montaña Aspen al sur y la Montaña Roja al norte, hay un grupo de bajas edificaciones rodeadas por una larga pradera cubierta de hierba. En los días de verano se puede ver a una docena de físicos sentados en

mesas de picnic, discutiendo, debatiendo y disfrutando del agradable clima. El edificio principal del Instituto de Física Teórica de Aspen no destaca mucho, pero inmediatamente detrás del mismo, en un agradable espacio al aire libre, hay una pizarra a la sombra de un chamizo. Ahí es donde tiene lugar la acción real, donde algunos de los más grandes físicos teóricos del mundo se reúnen para seminarios en los que discuten sus últimas ideas.

En 1964 yo era el único estudiante en el centro —creo que fui el único estudiante en los dos años de historia del instituto—, pero lo cierto es que yo no estaba allí por mi talento para la física. La ciudad está atravesada por el Roaring Fork River, que desciende desde la vecina Divisoria Continental. El agua es turbulenta, rápida, muy fría y, lo más importante para mí ese verano, llena de plata: no la plata metálica de las minas de plata sino la plata viva de la trucha irisada. Mi tutor, Peter, era un pescador con mosca y cuando supo que yo podía pescar con mosca, me invitó a pasar con él el verano en Aspen.

Cuando era niño, mi padre me había enseñado a pescar en los más tranquilos ríos trucheros del este, los legendarios Beaverkill River y Esopus Creek en las Catskill. Allí había remansos y uno podía meterse hasta que el agua le llegaba al pecho. A veces no sólo se podía ver la mosca sino también la trucha marrón cuando picaba. Pero en el Roaring Fork en junio, un pescador sensato tenía que quedarse en la orilla y tratar de adivinar dónde estaba la mosca. Aunque me llevó algún tiempo dominar la técnica, pesqué un

montón de truchas irisadas ese verano, pero no aprendí nada de física.

Ahora no estoy tan orgulloso de Aspen. La gente guapa ha reemplazado a los vaqueros, sin ninguna ventaja por lo que a mí concierne. Con los años, he vuelto algunas veces por la física, pero no para pescar. En algún momento de 1990, cuando pasaba por la ciudad de camino a Boulder, me detuve para dar una conferencia.

Para entonces, los agujeros negros y el enigma de la pérdida de información empezaban a mostrarse en la pantalla del radar. El consenso general era que Hawking tenía razón, pero unos pocos, además de 't Hooft y yo, lo estaban cuestionando. El inimitable Sidney Coleman estaba entre ellos.

Sidney era un personaje pintoresco y un héroe para toda una generación de físicos. Con bigote, ojos caídos, y un pelo largo y desordenado, siempre me recordaba a Einstein. Tenía una mente increíblemente rápida, y su capacidad para llegar rápidamente al corazón de las cosas, especialmente cuando la cuestión implicaba sutilezas difíciles, era legendaria. Sidney era un hombre afable pero no se caracterizaba por ser condescendiente con los locos. Más de un conferenciante bien conocido había salido de Harvard (donde Sidney era un catedrático veterano) con el rabo entre las piernas después de ser interrogado despiadadamente por Coleman. Ese día en Aspen, su presencia significaba que quien impartiera el seminario tendría que mantener el listón muy alto.

Por una extraordinaria coincidencia, había otra cara familiar en la audiencia. Cuando entré en el espacio del seminario al aire libre y

me dirigí a la pizarra, apareció una familiar silla de ruedas de alta tecnología y Stephen Hawking se colocó en primera fila. Como todos sabían, mi propósito era socavar los argumentos de Stephen sobre la pérdida de información. Mi estrategia consistía en esbozar primero la naturaleza del problema repitiendo el argumento de Stephen. Eso me llevaría aproximadamente la mitad de la hora de la que disponía. Luego explicaría por qué creía que el argumento no podía ser correcto. Pero también quería añadir un ingrediente extra al argumento de Stephen para hacerlo aún más fuerte. Cuanto más fuerte fuera el argumento de Stephen, mayor sería el cambio de paradigma implicado si se demostraba falso.

Al explicar el argumento de Stephen quería llenar una laguna en la que nadie había reparado aparentemente. La idea era ésta. Imaginemos que la región inmediatamente fuera del horizonte está ocupada por muchísimas fotocopiadoras minúsculas e invisibles. Cuando cualquier información —un documento escrito, por ejemplo— cae en el horizonte, las fotocopiadoras copian la información, lo que deja dos versiones exactamente idénticas. Una de las copias continúa, sin ser perturbada, a través del horizonte hasta el interior del agujero negro, para ser destruida finalmente en la singularidad. Pero el destino de la segunda copia es más complejo. Primero es completamente revuelta o barajada hasta que resulta irreconocible sin el código de barajado. Entonces es irradiada de nuevo entre la radiación de Hawking.

El fotocopiado de la información inmediatamente antes de que cruce el horizonte parecería resolver el problema. Pensemos primero en los

observadores que se ciernen muy lejos del agujero negro. Ven que cada bit de información es devuelto en la radiación de Hawking. Así, ellos concluyen que no hay razón para cambiar las reglas de la mecánica cuántica. En términos más categóricos, ellos concluyen que las ideas de Hawking sobre la destrucción de información son erróneas.

¿Qué pasa con el observador en caída libre? En el instante inmediatamente posterior al paso del horizonte, él mira a su alrededor y ve que nada ha sucedido. Sus bits siguen con él, ensamblados en la misma persona, acompañados de cualquier cosa que cayera con él. Desde este punto de vista, el horizonte sólo es un punto de no retorno inocuo, y el principio de equivalencia de Einstein se respeta perfectamente.

¿Podría suceder realmente que el horizonte de un agujero negro esté cubierto con perfectas y fieles fotocopiadoras en miniatura (quizá del tamaño de Planck)? Si es así, explicaría la paradoja de Stephen de una forma lógica y sencilla: ninguna información se perdería nunca en un agujero negro, y los físicos futuros podrían seguir utilizando los principios usuales de la mecánica cuántica. Las fotocopiadoras cuánticas en el horizonte de todo agujero negro llevarían la guerra de los agujeros negros a un final repentino.

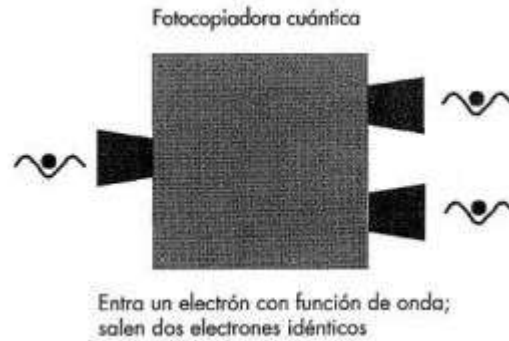
Sidney estaba impresionado. Él se giro en su silla para dar la cara a la audiencia. Entonces, como sólo Sidney podía hacer, explicó lo que yo había dicho en términos aún más claros que los que yo había utilizado. Pero Stephen no dijo nada. Hundido en su silla de ruedas, tenía una amplia sonrisa en su rostro. Estaba claro que él sabía

algo que Sidney no sabía. De hecho, Stephen y yo éramos conscientes de que mi explicación era un hombre de paja que yo había creado sólo para destruirlo.

Stephen y yo sabíamos que un copiador perfecto de información cuántica contradecía los principios de la mecánica cuántica. En un mundo gobernado por las reglas matemáticas establecidas por Heisenberg y Dirac, era imposible una fotocopidora perfecta. Yo tenía un nombre para este principio: *principio de imposibilidad de fotocopia cuántica*. En el campo moderno de la física conocido como teoría de la información cuántica, la misma idea se denomina *principio de imposibilidad de clonación*.

Con gesto triunfante, miré a Coleman y dije, «Sidney, las fotocopadoras cuánticas son imposibles», confiando en que lo captara inmediatamente. Pero por una vez, su rápido cerebro fue lento. Tuve que explicar el punto en detalle. La explicación que di a Sidney y a los demás en el seminario llenó la pizarra con ecuaciones matemáticas y ocupó todo el tiempo restante del seminario. He aquí una versión más simple.

Imaginemos una máquina con un puerto de entrada y dos puertos de salida. Cualquier sistema, en cualquiera de sus posibles estados cuánticos, puede insertarse en el puerto de entrada. Por ejemplo, puede cargarse un electrón en la fotocopadora. La máquina toma el original y expulsa dos electrones idénticos. Las salidas son idénticas no sólo entre sí sino también a la entrada original.



Si pudiera construirse una máquina semejante, nos daría una manera de batir al imbatible principio de incertidumbre de Heisenberg. Supongamos que queremos saber la posición y la velocidad de un electrón. Todo lo que tenemos que hacer es copiarlo y luego medir la posición de un clon y la velocidad del otro. Pero, por supuesto, eso es imposible dados los principios de la mecánica cuántica.

Cuando acabó la hora, yo había defendido con éxito la paradoja de Stephen y el principio de imposibilidad de fotocopiadora cuántica, pero no me había quedado tiempo para explicar mi propio punto de vista. Sólo cuando el seminario se estaba acabando, gritó la voz mecánica e incorpórea de Stephen, «¡Así que estás de acuerdo conmigo!». Había un brillo malévolo en sus ojos.

Evidentemente, yo había perdido esa batalla. Había sido derrotado por mi propio fuego amigo, por falta de tiempo, y especialmente por el rápido ingenio de Stephen. Cuando esa tarde salía de Aspen me detuve en Difficult Creek y saqué mi caña de pescar. Pero mi estanque favorito estaba lleno de chicos ruidosos flotando sobre neumáticos.

Tercera parte:
Contraataque

Capítulo 15

La batalla de Santa Bárbara

Era una tarde de viernes de 1993, y todos los demás se habían ido a casa. John, Lárus y yo estábamos sentados en mi despacho en Stanford, pasando el tiempo, bebiendo el café que había preparado Lárus. Los islandeses beben el café más fuerte de la Tierra. Según Lárus, eso tiene algo que ver con sus hábitos de bebida nocturnos. Lárus Thorlacius, un alto vikingo islandés (él afirma que no descende de guerreros nórdicos sino de esclavos irlandeses), era un estudiante postdoctoral en Stanford que acababa de recibir su título de doctor por Princeton. John Uglum, un tejano y republicano (no de la variedad religiosa, sino un libertario de Ayn Rand^v), era mi estudiante de doctorado. Cualesquiera que fueran nuestras diferencias políticas y culturales —yo soy un judío liberal del sur del Bronx— éramos colegas y estábamos en una reunión de hombres: sentados alrededor de unas tazas de café (a veces, de algo más fuerte), discutiendo de política y hablando de agujeros negros. (Un poco más tarde, Amanda Peet, una estudiante de Nueva Zelanda, ampliaría nuestra pequeña «banda de hermanos» a tres hermanos y una hermana).

Para 1993 los agujeros negros no sólo habían llegado a las pantallas de radar de los físicos; se habían convertido en el punto focal.

Parte de la razón era un artículo provocativo que habían escrito aproximadamente un año y medio antes cuatro físicos teóricos norteamericanos bien conocidos. Curt Callan, un aristócrata de Princeton, había sido un líder en el campo de la física de partículas elementales y miembro influyente de la comunidad científica norteamericana desde los años sesenta. (Él había sido el director de tesis de Lárus). Andy Strominger y Steve Giddings eran miembros más jóvenes y prometedores del claustro de la Universidad de California en Santa Bárbara (UCSB). En esa época, lo que les distinguía en mi cabeza era que Giddings llevaba pantalones cortos y Strominger llevaba tirantes. Jeff Harvey, de la Universidad de Chicago, era (y lo sigue siendo) un gran físico, un compositor de talento (véase el final del capítulo 24), y un cómico consumado. Colectivamente eran conocidos como CGHS, y la versión simplificada de los agujeros negros sobre la que habían escrito se denominaba agujeros negros CGHS. Su artículo conjunto había causado una sensación momentánea, en parte debido a que los autores afirmaban que finalmente habían resuelto el problema de la pérdida de información en la evaporación de los agujeros negros.

Lo que hacía tan simple la teoría CGHS —visto en retrospectiva, engañosamente simple— era que describía un universo con una única dimensión espacial. Su mundo era aún más simple que Planilandia⁶¹, el mundo ficticio bidimensional de Edwind Abbott. CGHS imaginaban un universo de criaturas que vivían en una línea

⁶¹ Ver Edwin A. Abbot, *Flatland: A Romance of Many Dimensions* (1984). (Hay trad. cast.: *Planilandia: una novela de muchas dimensiones*, Laertes, Barcelona, 2008).

infinitamente delgada. Estas criaturas eran lo más simple posible: nada más que simples partículas elementales. En un extremo de este universo unidimensional había un agujero negro masivo, suficientemente pesado y concentrado para atrapar cualquier cosa que se acercara demasiado.

El artículo que CGHS habían escrito era un análisis matemático extraordinariamente elegante de la radiación de Hawking, pero en algún lugar del análisis ellos habían cometido un error, al afirmar que la mecánica cuántica eliminaba la

Agujero negro CGHS



singularidad, y con ella el horizonte. Lárus y yo, junto con nuestro colega Jorge Russo, estábamos entre los que señalaron el error. Eso nos hacía expertos en agujeros negros CGHS. (Había incluso una versión particular de la teoría CGHS llamada modelo RST —de Russo, Susskind y Thorlacius).

La razón por la que John, Lárus y yo estábamos reunidos acabada la jornada ese viernes era que se había convocado una conferencia dedicada específicamente a los enigmas y paradojas de los agujeros negros. La conferencia iba a tener lugar dos semanas más tarde en Santa Bárbara, sede del Instituto de Física Teórica (ITP) en la UCSB⁶². ¿Era el ITP una buena institución en física? La respuesta breve es que era realmente buena. En 1993 se había convertido en un centro activo en la investigación de agujeros negros.

⁶² Hoy el ITP es conocido como el KITP, el Instituto Kavli de Física Teórica.

James Hartle era el más veterano de los teóricos de agujeros negros en el claustro de la UCSB. Jim era un patriarca muy distinguido que había hecho un trabajo pionero con Stephen Hawking sobre gravedad cuántica mucho antes de que se hubiese convertido en un tema popular. Pero había cuatro miembros más jóvenes en el departamento de física que estaban destinados a desempeñar grandes papeles en la guerra de los agujeros negros. Los cuatro eran treintañeros y extraordinariamente activos. Ya le he presentado a Steve Giddings y Andy Strominger (la G y la S de CGHS). Aunque ambos eran amigos míos y yo admiraba su física, ellos se manifestaron como enemigos encarnizados durante los dos años siguientes. A menudo llegaban a irritarme con su tozuda adhesión a ideas equivocadas. Finalmente, sin embargo, hicieron más que redimirse.

Gary Horowitz era el tercer joven del claustro de UCSB. Gary es un experto en relatividad general —un *relativista*— que por entonces se estaba haciendo un nombre como brillante líder en el campo. También había trabajado estrechamente con Hawking y sabía sobre agujeros negros tanto como el que más. Finalmente, Joe Polchinski se había trasladado recientemente a Santa Bárbara desde la Universidad de Texas. Joe y yo habíamos colaborado en varios proyectos de investigación, y yo le conocía bien. Aunque siempre lo encontré una persona muy agradable, lleno de buen humor, también sentía respeto por su potencia y rapidez intelectual y su extraordinaria brillantez. Desde los primeros días de nuestra amistad —Joe debía tener entonces unos veinticinco años, y yo

cuarenta— yo no había tenido ninguna duda de que estaba destinado a convertirse en uno de los más grandes físicos teóricos de la era. No me decepcionó.

Estos jóvenes y extraordinarios físicos trabajaban en estrecha colaboración. A veces el tema eran los agujeros negros, otras veces la teoría de cuerdas. El enorme talento de este grupo pequeño y muy unido hacía de ellos una fuerza muy poderosa en la física teórica. También hacía de Santa Bárbara uno de los lugares más excitantes (si no *el* lugar más excitante) para un físico teórico. No había duda de que una conferencia en Santa Bárbara dedicada a los enigmas de los agujeros negros sería un importante acontecimiento. Probablemente la conferencia se había convocado para celebrar la expectación que había creado el artículo CGHS. Se esperaba que las técnicas matemáticas que habían ideado CGHS guardarían la clave para lo que por entonces se estaba llamando *paradoja de la información*. Los organizadores de la conferencia me habían pedido que informara sobre el trabajo que Lárus, Jorge y yo habíamos hecho en Stanford, y por ello aquí estábamos, a última hora del viernes, discutiendo lo que yo iba a decir.

Fuera por el café supercargado, por un ataque de testosterona o simplemente por una camaradería como la de los Tres Mosqueteros, el caso es que yo dije a John y Lárus, «Maldita sea, yo no quiero hablar de CGHS ni de RST. Es un callejón sin salida⁶³. Quiero que

⁶³ Visto en retrospectiva, creo que la teoría CGHS nos enseñó muchas cosas. Más que todo lo que vino antes, dio una formulación matemática y cristalina de la contradicción que Hawking había sacado a la luz. Desde luego tuvo una gran influencia en mi pensamiento.

hagamos algo que realmente remueva las cosas. Salgamos del limbo y digamos algo muy atrevido que realmente llame su atención».

Los tres habíamos estado buscando durante algún tiempo una vía de escape de la paradójica conclusión de Stephen, y una idea empezaba a concretarse. No era mucho más que una noción confusa —ni siquiera tenía un nombre— pero había llegado el momento de actuar.

La historia «No olvide tomar sus píldoras antigraedad» (véase capítulo 13) es un buen lugar para empezar a explicar lo que yo tenía en mente. Como en la película *Rashômon* de Akira Kurosawa, es una historia vista a través de los ojos de diferentes participantes: una historia con conclusiones completamente contradictorias. En una versión —la del emperador y el conde—, Steve, el físico perseguido, era aniquilado por el ambiente increíblemente caliente que rodea el horizonte. Según Steve, la historia tenía un final diferente y más feliz. Obviamente, uno u otro, sino ambos, tenía que estar equivocado; Steve no podía haber sobrevivido y haber muerto en el horizonte al mismo tiempo.

«El punto importante sobre la complementariedad de agujero negro», expliqué a mis colegas, «es que por loco que parezca, ambas historias *son* igualmente verdaderas».

Mis dos amigos estaban intrigados. Ya no recuerdo exactamente lo que les dije a continuación, pero debió ser algo parecido a esto: «Todos los que permanecían fuera del agujero negro —el conde, el

emperador y los ciudadanos leales al emperador— veían lo mismo⁶⁴: Steven era calentado, vaporizado y convertido en radiación de Hawking. Y lo que es más, todo sucedía inmediatamente antes de que alcanzara el horizonte».

¿Cómo podíamos darle sentido? La única forma compatible con las leyes de la física sería suponer que existe algún tipo de capa supercalentada justo por encima del horizonte, quizá de un espesor no mayor que una longitud de Planck. Admití ante John y Lárus que yo no sabía de qué estaba hecha exactamente esta capa, pero expliqué que la entropía de un agujero negro significa que la capa debe estar compuesta de objetos minúsculos, probablemente no mayores que una longitud de Planck. La capa caliente absorbería cualquier cosa que cayera en el horizonte, igual que las gotas de tinta se disuelven en el agua. Recuerdo que llamé *átomos de horizonte* a los minúsculos objetos desconocidos, pero por supuesto no quería decir átomos ordinarios. Sabía tanto de dichos átomos como los físicos del siglo XIX sabían de los átomos ordinarios: sólo que existen.

Esta capa caliente de material necesitaba un nombre. Los astrofísicos ya habían acuñado el nombre que yo establecí finalmente. Ellos habían utilizado la idea de una membrana imaginaria que cubre el agujero negro justo por encima del horizonte para analizar ciertas propiedades eléctricas de los agujeros negros. Los astrofísicos habían llamado a esta superficie

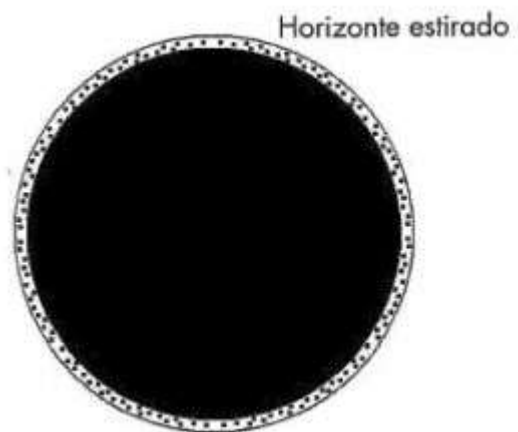
⁶⁴ Estoy utilizando «veían» en un sentido amplio. Los observadores fuera del agujero negro podían detectar la energía, e incluso los bits de información individuales que el cuerpo de Steve contenía, en forma de radiación de Hawking.

imaginaria el horizonte estirado, pero yo estaba proponiendo una capa de materia real localizada a una longitud de Planck sobre el horizonte, no una superficie imaginaria. Y lo que es más, yo afirmaba que cualquier experimento —bajar un termómetro y medir la temperatura, por ejemplo— confirmaría la existencia de átomos de horizonte⁶⁵.

Me gustaba cómo sonaba «horizonte estirado» y lo adopté para mis propios fines. Hoy el horizonte estirado es un concepto estándar en la física de agujeros negros. Significa la fina capa de microscópicos «grados de libertad» calientes localizada aproximadamente a una longitud de Planck sobre el horizonte.

El horizonte estirado nos ayuda a entender cómo se evapora un agujero negro. De vez en cuando, uno de los energéticos átomos del horizonte se hace un poco más duro de lo usual y es expulsado desde la superficie al espacio. Casi se podría

considerar el horizonte estirado como una capa de atmósfera fina y caliente. En este sentido, la descripción de la evaporación del agujero negro guardaría un estrecho paralelismo con la forma en que la atmósfera de la Tierra se evapora poco a poco al espacio



⁶⁵ Los físicos sabían desde los años setenta que un termómetro descendido hasta la vecindad de un horizonte registraría una alta temperatura. Bill Unruh, el inventor de los agujeros mudos, había descubierto esto mientras era estudiante de John Wheeler.

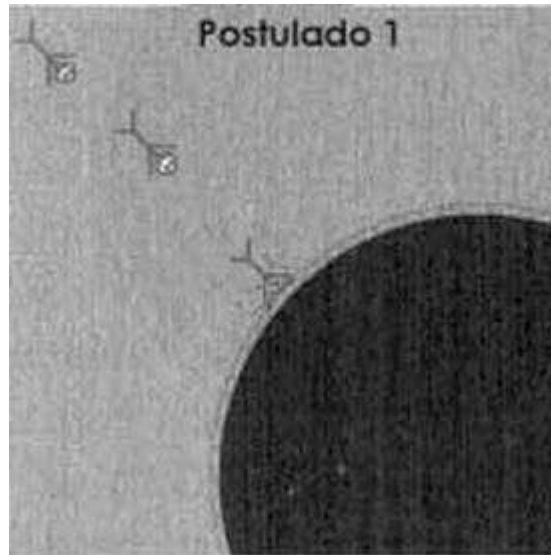
exterior. Y lo que es más, puesto que un agujero negro pierde masa cuando se evapora, también debe contraerse.

Pero esto era sólo la mitad de la historia, la mitad vista desde un punto fuera del agujero negro. Por sí misma, esta mitad de la historia no era nada radical. La materia cae en una sopa caliente. La sopa caliente se evapora. Los bits de información se van en los productos de la evaporación. Todo muy normal. Si yo hubiera estado hablando de cualquier otra cosa que no fuera un agujero negro, habría sido una explicación rutinaria.

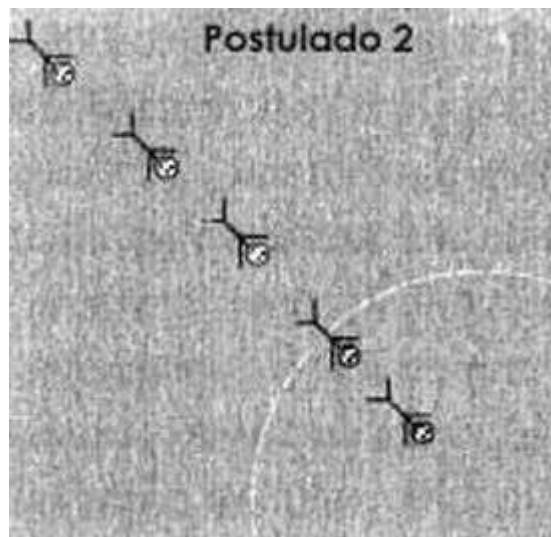
¿Qué pasa con la visión desde el interior, o más exactamente, la vista por un observador en caída libre? La llamaríamos visión de Steve, que parecería contradecir el informe desde el exterior (la versión del emperador y del conde).

Yo proponía dos postulados.

1. Para cualquier observador que permanece fuera de un agujero negro, el horizonte estirado parece una capa caliente de átomos de horizonte que absorben, revuelven y finalmente emiten (en forma de radiación de Hawking) cada bit de información que cae en el agujero negro.



2. Para un observador en caída libre, el horizonte parece espacio absolutamente vacío. Los observadores en caída no detectan nada especial en el horizonte, aunque para ellos es un punto de no retorno. Sólo encuentran un entorno destructivo mucho más tarde, cuando finalmente se aproximan a la singularidad.



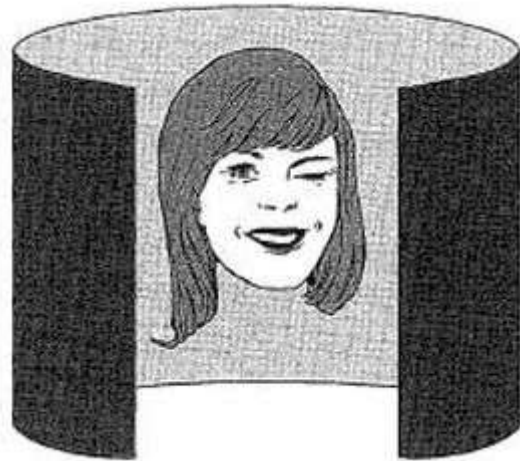
Era superfluo añadir un tercer postulado, pero lo hice en cualquier caso.

3. Los postulados 1 y 2 son verdaderos, y la aparente contradicción no es real.

Lárus era escéptico. ¿Cómo es posible, preguntaba, que dos historias contradictorias sean verdaderas al mismo tiempo? Hay una contradicción lógica en decir que el Steve en caída era destruido en el horizonte y, a la vez, sobrevivía durante otro millón de años. La lógica básica dice que una cosa y su opuesta no pueden ser ciertas a la vez. De hecho, yo también me hacía la misma pregunta.

En el segundo piso del departamento de física de Stanford solía haber una muestra de un holograma. La luz reflejada en una película bidimensional con una pauta aleatoria de puntos oscuros y brillantes se concentraba en el espacio y formaba una imagen tridimensional flotante de una joven muy sexy que te guiñaba el ojo cuando pasabas.

Uno podía caminar alrededor de la imagen ficticia y verla desde ángulos diferentes. A Lárus, a John y a mí nos gustaba pasar de vez en cuando. Ahora yo le decía en broma a Lárus que la superficie del agujero negro —el horizonte— debía ser un holograma, una película



bidimensional de todo el material tridimensional que había dentro del agujero negro. Lárus no lo aceptaba. Ni lo aceptaba yo, por lo menos en ese momento. De hecho, yo no veía realmente la importancia de mi propio comentario.

Pero yo había estado pensando sobre ello durante un tiempo y tenía una respuesta más seria. La física es una ciencia experimental y observacional; cuando se prescindie de todas las imágenes mentales, lo que queda es una colección de datos experimentales, junto con ecuaciones matemáticas que resumen los datos. Una contradicción genuina no significa una discrepancia entre dos imágenes mentales. Las imágenes mentales tienen más que ver con limitaciones impuestas por nuestro pasado evolutivo que con las realidades que estamos tratando de comprender. Una contradicción genuina ocurre sólo cuando los experimentos llevan a resultados contradictorios. Por ejemplo, si dos termómetros idénticos se sumergieran en un puchero de agua caliente y cada uno de ellos diera una temperatura diferente, no aceptaríamos los resultados; sabríamos que algo andaba mal en alguno de los termómetros. Las imágenes mentales son valiosas en física, pero sí parecen llevar a una contradicción donde no hay ninguna en los datos, la imagen no es la correcta.

¿Podríamos poner de manifiesto una contradicción genuina si postuláramos que las dos historias del agujero negro eran verdaderas, la de Steve y la del conde? Para detectar una contradicción, dos observadores tendrían que juntarse al final del experimento y comparar sus notas. Pero si una observación estaba hecha detrás del horizonte y el otro observador nunca lo cruzó, entonces, por la misma definición de un horizonte, ellos no podrían juntarse y comparar datos. Por eso no habría contradicción real; sólo una mala imagen mental.

John preguntó cómo respondería Hawking. Mi respuesta, que resultó muy aproximada, fue, «¡Ah!, Stephen sonreirá».

Complementariedad

La palabra *complementariedad* fue introducida en física por la legendaria figura patriarcal de la mecánica cuántica, Niels Bohr. Bohr y Einstein eran amigos, pero discrepaban incesantemente acerca de las paradojas y aparentes contradicciones de la mecánica cuántica. Einstein fue el verdadero padre de la mecánica cuántica, pero llegó a aborrecer el tema. De hecho, utilizó todas sus inigualables potencias intelectuales para tratar de encontrar lagunas en sus fundamentos lógicos. Una vez tras otra, Einstein pensaba que había descubierto una contradicción, y una vez tras otra, Bohr respondía a su golpe con su propia arma: la complementariedad.

No era casual que yo utilizara el término *complementariedad* al describir cómo se resolverían las paradojas de los agujeros negros cuánticos. En los años veinte del siglo pasado, la mecánica cuántica estaba llena de aparentes contradicciones. Una de ellas era la controversia no resuelta sobre la luz: ¿era ondas o era partículas? A veces parecía como si la luz se comportara de una manera y a veces de la manera opuesta. Decir que la luz era ambas cosas —ondas y partículas— era absurdo. ¿Cómo sabríamos cuándo utilizar ecuaciones para partículas y cuando utilizar ecuaciones de ondas?

Otro enigma: pensamos en las partículas como objetos minúsculos que ocupan una posición en el espacio. Pero las partículas pueden

viajar de un punto a otro. Para describir su movimiento tenemos que especificar con qué rapidez y en qué dirección se mueven. Casi por definición, una partícula es una cosa que tiene una posición y una velocidad. ¡Pero no! Con una lógica que parecía desafiar la lógica, el principio de incertidumbre de Heisenberg insistía en que posición y velocidad no pueden especificarse al mismo tiempo. Más absurdos.

Algo muy extraño estaba pasando. Parecía que la razón estaba siendo arrojada por el lavabo. Por supuesto, no había contradicción real en los datos experimentales; todo experimento daba un resultado definido, una lectura en un dial, un número. Pero había algo muy equivocado en la imagen mental. El modelo de la realidad que está cableado en nuestros cerebros no podía captar el verdadero carácter de la luz o la manera incierta en que se mueven las partículas.

Mi visión de las paradojas de los agujeros negros era la misma que la visión de Bohr sobre las paradojas de la mecánica cuántica. En física, una contradicción es sólo una contradicción si lleva a resultados experimentales incompatibles. Bohr era también escrupuloso en el uso preciso de las palabras. Cuando se utilizan de un modo impreciso, las palabras llevan a veces a la apariencia de una contradicción donde no hay ninguna.

La complementariedad se refiere al mal uso de una sencilla conjunción: *y*. «La luz es ondas, *y* la luz es partículas». «Una partícula tiene una posición y una velocidad». Pero, decía Bohr, prescindamos de *y*, y reemplacémosla por *o*; «La luz es ondas, *o* la

luz es partículas». «Una partícula tiene una posición o una velocidad».

Lo que Bohr quería decir era que en ciertos experimentos la luz se comporta como una colección de partículas, mientras que en otros experimentos se comporta como una onda. No hay ningún experimento en el que se comporte de ambas maneras. Si usted mide una característica de ondas —por ejemplo, el valor del campo eléctrico a lo largo de la onda— obtendrá una respuesta. Si mide una propiedad de partícula, tal como la localización de los fotones en un haz luminoso de muy baja intensidad, también obtendrá una respuesta. Pero no trate de medir una propiedad de onda al mismo tiempo que mide una propiedad de partícula. Una cosa se pone en el camino de la otra. Usted puede medir una propiedad de onda o una propiedad de partícula. Bohr decía que ni ondas ni partículas son descripciones completas de la luz, pero se *complementan* mutuamente.

Exactamente lo mismo es cierto de la posición y la velocidad. Algunos experimentos son sensibles a la posición de un electrón; por ejemplo, el punto en donde un electrón incide en una pantalla de televisor y la ilumina. Otros experimentos son sensibles a su velocidad; por ejemplo, cuánto se curva la trayectoria de un electrón cuando pasa cerca de un imán. Pero ningún experimento puede ser sensible a la posición y la velocidad precisas del electrón.

El microscopio de Heisenberg

Pero *¿por qué* no podemos medir la posición y la velocidad de una partícula al mismo tiempo? Determinar la velocidad de un objeto es en realidad medir su posición en dos instantes sucesivos y ver cuánto se ha movido entre los dos. Si es posible medir la posición de una partícula una vez, seguramente puede hacerse dos veces. Parece contradictorio pensar que no pueden medirse a la vez la posición y la velocidad. A este respecto, parecía que Heisenberg estaba diciendo cosas sin sentido.

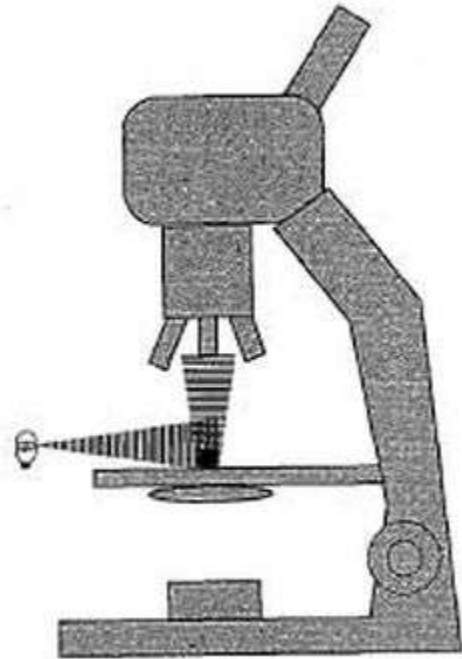
La estrategia de Heisenberg fue un brillante ejemplo del tipo de reflexión que hace tan convincente la complementariedad. Como Einstein, se convirtió en un experimentador mental. ¿Cómo, preguntaba, trataría uno de medir la posición y la velocidad del electrón al mismo tiempo?

En primer lugar, él entendió que para deducir la velocidad tendría que medir la posición en dos instantes diferentes. Además, tendría que medir la posición sin perturbar el movimiento del electrón, pues de lo contrario la perturbación podría invalidar la medida de la velocidad original.

La forma más directa de medir la posición de un objeto es mirarlo. En otras palabras, arrojar luz sobre el objeto y deducir su posición a partir de la luz reflejada. De hecho, nuestros ojos y cerebros tienen una circuitería especialmente incorporada para determinar la localización de un objeto a partir de la imagen en la retina. Ésta es una de esas destrezas físicas que proporcionó la evolución.

Heisenberg imaginó que se miraba el electrón con un microscopio.

La idea consistía en golpear muy suavemente el electrón con un rayo de luz —suavemente para no darle un fuerte impulso y cambiar su velocidad— y luego concentrar la luz para formar una imagen. Pero Heisenberg se encontraba atrapado por las propiedades de la luz. En primer lugar, la dispersión de la luz por un solo electrón es una tarea para la teoría corpuscular de la



radiación electromagnética. La forma más suave con la que Heisenberg podía tratar al electrón consistía en incidir sobre él con un solo fotón. Además, tendría que ser un fotón muy suave, uno de muy baja energía. Una colisión con un fotón energético produciría el tipo de impulso indeseado que él quería evitar.

Todas las imágenes hechas con ondas son intrínsecamente borrosas, y cuanto mayor es la longitud de onda, más borrosa es la imagen. Las ondas de radio tienen las longitudes de onda más largas, desde treinta centímetros en adelante. Las ondas de radio forman imágenes excelentes de objetos astronómicos, pero si usted tratara de hacer con radio un retrato de un rostro, simplemente obtendría un borrón.

Bajando en la escala de longitudes de onda, las ondas que siguen son las microondas. Un retrato hecho concentrando microondas de diez centímetros seguiría siendo demasiado borroso para mostrar los rasgos. Pero cuando la longitud de onda se redujera hasta un par de centímetros, empezarían a aparecer nariz, ojos y boca.



La regla es simple: no se puede obtener una resolución mejor que la longitud de onda de las ondas que forman la imagen.



Los rasgos faciales tienen un tamaño de pocos centímetros y se focalizarán cuando la longitud de onda llegue a ese tamaño. Para

cuando la longitud de onda sea una décima de centímetro, un rostro estará bastante nítido, aunque se pudiera pasar por alto un pequeño grano.



Supongamos que Heisenberg quisiera tomar una foto suficientemente nítida del electrón para ver su localización con una precisión de una micra⁶⁶. Tendría que utilizar luz con una longitud de onda menor que una micra.

Ahora viene la trampa. Recuerde del capítulo 4 que cuanto más corta es la longitud de onda de un fotón, mayor es su energía. Por ejemplo, la energía de un sólo fotón de radio sería tan pequeña que casi no tendría ningún efecto en un átomo. Por el contrario, la energía de un fotón de una micra sería suficiente para excitar un

⁶⁶ Una micra es una millonésima de metro. Es aproximadamente el tamaño de una bacteria muy pequeña.

átomo lanzando un electrón «escaleras arriba» hasta una órbita cuántica más energética. Un fotón ultravioleta, con una longitud de onda diez veces menor, sería suficientemente energético para expulsar al electrón del átomo. Por eso Heisenberg estaba atrapado. Si quería determinar la posición del electrón con gran precisión, habría un coste. Tendría que golpearle con un fotón muy energético, que a su vez «daría una patada» al electrón y alteraría su movimiento de una manera aleatoria. Si utilizara un fotón suave con poca energía, lo mejor que podría hacer sería obtener una idea muy borrosa de la localización del electrón. Era una auténtica Trampa-22.

Cabría preguntarse si es siquiera posible medir la velocidad de un electrón. La respuesta es sí. Lo que hay que hacer es medir su posición dos veces, pero con una precisión muy pobre. Por ejemplo, se podría utilizar un fotón de longitud de onda larga para obtener una imagen muy borrosa, y luego hacerlo de nuevo mucho tiempo más tarde. Midiendo las dos imágenes borrosas es posible determinar con precisión la velocidad, pero con un gran coste para la precisión de la posición.

Heisenberg no podía pensar en nada que le permitiera determinar la posición y la velocidad del electrón al mismo tiempo. Yo imagino que él, y por supuesto su mentor Bohr, empezaron a preguntarse si tenía sentido suponer que un electrón tiene posición y velocidad. Según la filosofía de Bohr, se puede describir un electrón como algo que tiene una posición que puede medirse utilizando fotones de corta longitud de onda, o se puede describir un electrón como algo

que tiene una velocidad que puede medirse utilizando fotones de gran longitud de onda, pero no las dos cosas. La medida de una propiedad impide la medida de la otra. Bohr lo expresaba diciendo que los dos tipos de conocimiento —posición y velocidad— eran aspectos complementarios del electrón. Por supuesto, no había nada especial sobre el electrón en el argumento de Heisenberg; podría haber sido un protón, un átomo o una bola de bolos.

La historia del conde, el emperador y Steve parece adolecer de una contradicción, pero la contradicción es sólo aparente. Buscar un bit de información dentro del horizonte y al mismo tiempo buscarlo fuera del horizonte se excluyen mutuamente de la misma forma que las medidas de posición y velocidad se excluyen mutuamente. Nadie puede estar a la vez detrás del horizonte y delante del mismo. Eso, al menos, es lo que yo quería afirmar en Santa Bárbara.

Santa Bárbara

Los agujeros negros son reales. El universo está lleno de ellos, y son algunos de los objetos astronómicos más espectaculares y violentos. Pero en la reunión de 1993 en Santa Bárbara, la mayoría de los físicos no estaban particularmente interesados en los agujeros negros astronómicos. El foco de interés estaba en los experimentos mentales, y no en las observaciones astronómicas. La paradoja de la información había emergido finalmente a lo grande.

La asistencia a la conferencia no fue muy numerosa; quizá un centenar de participantes como mucho. Cuando entré en el auditorio vi a mucha gente que conocía. Stephen estaba en su silla

de ruedas a un lado. Jacob Bekenstein, con quien nunca había coincidido, estaba sentado cerca del centro de la audiencia. El equipo local —Steve Giddings, Joe Polchinski, Andy Strominger y Gary Horowitz— estaba bien visible. Ellos iban a desempeñar papeles importantes en la revolución inminente, pero entonces eran el enemigo, los confundidos soldados de infantería del ejército de los perdedores de información. Gerard 't Hooft estaba sentado en primera fila, listo para la batalla.

La charla de Hawking

Esto es lo que recuerdo de la charla de Hawking. Stephen se sentaba hundido en su silla de ruedas, su cabeza demasiado pesada para mantenerla erguida, mientras los demás esperábamos en silencio expectante. Él estaba en el lado derecho del estrado, desde el que podía ver la gran pantalla de proyección en la parte frontal de la habitación y también explorar a la audiencia. Para entonces Stephen había perdido la capacidad de hablar con sus cuerdas vocales. Su voz electrónica recitaba un mensaje pregrabado, mientras un ayudante operaba desde detrás el proyector de diapositivas. El proyector estaba sincronizado con el mensaje grabado. Yo me preguntaba qué falta hacía que él estuviera allí.

Pese a su sonido robótico, su voz estaba llena de personalidad. Su sonrisa transmitía una confianza y seguridad supremas. Hay un misterio en las actuaciones de Stephen: ¿cómo la presencia de su cuerpo frágil e inmóvil inspira tanta vida en un suceso por lo demás

inerte? Con apenas un guiño, el rostro de Stephen transmite un magnetismo y un carisma que pocos hombres tienen.

La charla en sí misma no fue memorable, al menos por su contenido. Stephen habló sobre lo que se esperaba que hablase —de lo que yo no quería hablar— la teoría CGHS y cómo CGHS la habían creado (él generosamente dio el crédito a RST por descubrir el error). Su mensaje principal era que si uno hacía adecuadamente las matemáticas de CGHS, los resultados apoyaban su propia teoría de que la información no puede ser irradiada desde un agujero negro. Para Stephen, la lección a sacar de CGHS era que las matemáticas de la teoría simplemente demostraban su afirmación. Para mí la lección era que la imagen mental no sólo era defectuosa sino que los fundamentos matemáticos de la gravedad cuántica, al menos tal como estaban incorporados en CGHS, eran inconsistentes.

Lo más inusual en las charlas de Stephen es el período de preguntas y respuestas que les sigue. Uno de los organizadores de la conferencia sube al estrado para recabar preguntas de la audiencia. Normalmente las preguntas son técnicas, y a veces son muy largas, diseñadas para mostrar que quien pregunta conoce la materia. Pero el auditorio está mortalmente callado: un centenar de acólitos se convierten en monjes mudos en una catedral extrañamente silenciosa. Stephen está componiendo su respuesta. El método con el que se comunica con el mundo exterior es sorprendente. Él no puede hablar ni levantar una mano para hacer señas. Sus músculos están tan atrofiados que apenas puede ejercer ninguna fuerza. No tienen ni la fuerza ni la coordinación para

escribir en un teclado. Si la memoria no me engaña, en esa ocasión se comunicaba ejerciendo una débil presión en un joystick⁶⁷.

Él tiene una pequeña pantalla de ordenador acoplada al brazo de su silla de ruedas, y una serie de palabras y letras electrónicas aparecen en la pantalla, en una sucesión más o menos continúa. Stephen las escoge una a una y las almacena en el ordenador para formar una frase o dos. Esto puede necesitar diez minutos. Mientras el oráculo está componiendo su respuesta, la habitación está silenciosa como una cripta. Cesa toda conversación mientras crecen el suspense y la expectación. Finalmente llega la respuesta: puede ser no más que sí o no, o quizá una frase o dos.

He visto esto tanto en una sala con cien físicos como en un estadio con cinco mil espectadores, incluido un presidente sudamericano, el jefe del ejército y varios generales. Mi reacción ante el extraordinario silencio ha ido desde la diversión a la seria indignación (¿por qué pierdo el tiempo en esta farsa?). Siempre me entran ganas de hacer ruido, quizá simplemente hablar a mi vecino, pero nunca lo hago.

¿Qué hay en Stephen que exige la atención fascinada que podría recibir un hombre santo a punto de revelar los más profundos secretos de Dios y el universo? Hawking es un hombre arrogante, pagado de sí mismo, extremadamente ególatra. Pero eso mismo es cierto de la mitad de la gente que conozco, incluido yo mismo. Creo que la respuesta a esta pregunta es en parte la magia y el misterio del intelecto incorpóreo que navega por el universo en su silla de

⁶⁷ Hoy día es aún más difícil: el joystick ha sido reemplazado por un sensor que detecta mínimos movimientos de los músculos de la mejilla de Stephen.

ruedas. Pero otra parte de ella es que la física teórica es un mundo pequeño compuesto de personas que se conocen desde hace años. Stephen es una parte querida y profundamente respetada de dicha familia, incluso si a veces genera frustración e irritación. Todos somos muy conscientes de que él no tiene manera de comunicarse excepto a través del largo y tedioso proceso que utiliza. Puesto que valoramos su punto de vista, nos sentamos en silencio, esperando. Creo también que la concentración de Stephen es tan intensa durante el proceso de composición que ni siquiera es consciente del extraño silencio que le rodea.

Como he dicho, la charla no fue memorable. Stephen hizo la afirmación habitual: la información entra en un agujero negro y nunca sale. Para cuando el agujero negro se evapora, está completamente borrada.

Inmediatamente después vino la charla de Gerard 't Hooft. También él es un hombre de gran carisma y enormemente admirado dentro de la comunidad de la física. Gerard tiene una fuerte presencia escénica y desprende una enorme autoridad. Aunque no siempre es fácil de entender, no tiene nada del misterio oracular de Hawking. Él es un holandés bastante directo y razonable.

Las presentaciones de Gerard son siempre divertidas. Le gusta utilizar el cuerpo para ilustrar algunos puntos, y sabe cómo crear gráficos espectaculares. Después de todos estos años, aún recuerdo un video que hizo para ilustrar el horizonte de un agujero negro. Una esfera estaba embaldosada con píxeles que eran blancos o negros aleatoriamente. Cuando se pasaba el vídeo, los píxeles

empezaban a cambiar de negro a blanco y viceversa. La imagen se parecía al ruido blanco en la pantalla de un televisor averiado. Era muy evidente que 't Hooft tenía ideas muy similares a las mías sobre la existencia de una capa activa de átomos de horizonte rápidamente cambiantes que constituyen la entropía de un agujero negro. (Yo esperaba que me robara mis truenos y diera su propia versión de la complementariedad de agujero negro, pero si él estaba pensando en eso, no lo dijo con claridad).

'T Hooft es un pensador extraordinariamente profundo y original. Como sucede con muchas personas muy originales, a veces no es claro para los demás. Después de su charla sobre los agujeros negros, era obvio que había perdido a la audiencia. No es que hubiera aburrido a la audiencia, ni mucho menos, sino que no podían entender su lógica. Recuerde que se suponía que el horizonte de un agujero negro es espacio vacío, no una pantalla de televisor averiado.

En general, dudo que uno u otro hubieran cambiado la opinión de nadie sobre el destino de la información en un agujero negro. Nadie encuestó a la audiencia, pero yo conjeturaría que en ese momento había un sesgo de dos a uno a favor de Hawking.

Lo que yo encontraba extraordinario en casi todo lo demás de la conferencia era el tozudo rechazo a sostener la solución correcta de la paradoja. La mayoría de las conferencias mencionaban las tres posibles soluciones:

1. La información sale en la radiación de Hawking.
2. La información se pierde.

3. La información reside finalmente en algún tipo de agujero negro minúsculo remanente que queda tras la evaporación. (Normalmente el remanente no era mayor que un tamaño de Planck y no más pesado que la masa de Planck.)

Charla tras charla repetían estas tres posibilidades e inmediatamente descartaban la primera. Entre los oradores había un amplio consenso en que o bien la información se perdía, como defendía Hawking, o algunos minúsculos remanentes eran capaces de ocultar cantidades de información indefinidamente grandes. Quizá había también algunos defensores de universos bebé, pero no lo recuerdo. Casi nadie, con excepción de 't Hooft y otros dos, expresó su confianza en las leyes habituales de la información y la entropía.

Don Page estuvo cerca de expresar esa confianza. Page es un hombre corpulento y amable, un natural de Alaska con un enorme apetito. Hiperactivo, vociferante y entusiasta al extremo, Don es una contradicción andante, al menos para mí. Es un físico sobresaliente y un pensador profundo. Su comprensión de la teoría cuántica de campos, la teoría de la probabilidad, la información, los agujeros negros y los fundamentos del conocimiento científico es impresionante. También es un cristiano evangélico. Una vez estuvo explicándome durante más de una hora, utilizando argumentos matemáticos, que la probabilidad de que Jesús fuera Hijo de Dios superaba el 96 por 100. Pero su física y sus matemáticas están libres de ideología y son brillantes. Su trabajo ha tenido un impacto

profundo no sólo en mi propio pensamiento sobre los agujeros negros sino también en todo el campo.

En su charla, Don repitió el mantra de las tres posibilidades, pero parecía mucho menos dispuesto que los demás a descartar la primera. Yo tenía la sensación de que él creía realmente que los agujeros negros se comportaban como todos los demás objetos de la Naturaleza, respetando las leyes usuales que requieren que la información se fugue durante la evaporación. Pero tampoco él podía ver la manera de reconciliar esto con el principio de equivalencia. Resulta notable la resistencia que oponían los físicos de la época a la posibilidad de que la información se fugue en la radiación de Hawking de la misma forma que escapa de un puchero de agua que se evapora.

La complementariedad de agujero negro

La guerra de los agujeros negros había llegado a una situación de jaque ahogado. Ningún bando parecía capaz de hacer ningún movimiento. De hecho, la niebla de la guerra era tan densa que resultaba difícil ver los dos bandos. Aparte de Hawking y de 't Hooft, la impresión que yo tenía era la de una dubitativa multitud de tropas traumatizadas en un estado de gran confusión.

Mi charla estaba programada para ese mismo día. Yo me sentía como Sherlock Holmes cuando decía a Watson: «*Cuando has eliminado todo lo que es imposible, lo que queda, por improbable que sea, debe ser lo cierto*». Cuando finalmente salí a hablar, sentía que todo había sido eliminado excepto una posibilidad; una posibilidad

que, a primera vista, sonaba tan improbable que parecía estrafalaria. Sin embargo, pese al absurdo de la complementariedad de agujero negro, tenía que ser correcta. Todas las alternativas pertenecían a lo imposible.

«No me preocupa que estéis de acuerdo con lo que yo digo. Sólo quiero que recordéis que lo dije». Éstas fueron mis dos frases de apertura; después de catorce años, aún las recuerdo. Luego, en la jerga física técnica, esboqué los dos resultados contradictorios de lo que era, en esencia, la historia de Steve. «Obviamente, al menos uno de los finales debe ser falso puesto que dicen cosas opuestas». Hubo muchos movimientos de cabeza afirmativos. Pero entonces continué, «Sin embargo, he venido para contaros lo imposible. Ninguna de las dos historias es falsa. Ambas son verdaderas... en formas complementarias».

Después de explicar cómo había utilizado Bohr el término *complementariedad*, argumenté que en el caso de un agujero negro el experimentador se enfrenta a una elección: permanecer fuera del agujero negro y registrar los datos desde el lado seguro del horizonte, o saltar al interior del agujero negro y hacer observaciones desde dentro. «Uno no puede hacer las dos cosas», insistí⁶⁸.

Imagine que se entrega un paquete en su casa. Un amigo que pasa observa que el cartero no pudo entregar el paquete y por eso se lo llevó de vuelta a la camioneta. Mientras, usted (que está en la casa)

⁶⁸ El lenguaje que utilicé era el de las matemáticas técnicas habituales que utilizan los físicos teóricos para comunicarse, pero yo estaba atacando una imagen mental extraída de la experiencia previa, y no una fórmula matemática. También podría haber utilizado imágenes.

abre la puerta y toma el paquete de manos del cartero. Creo que yo tendría toda la razón para decir que las dos observaciones no pueden ser ciertas. Alguien está confundido.

¿Por qué un agujero negro es diferente? Yo sugeriría que sigamos un poco más la historia del paquete. Traducida desde la jerga técnica y los símbolos matemáticos, la historia continuaba más o menos como sigue:

«Más tarde ese mismo día, usted sale de casa y se encuentra a su amigo en el café. Él le dice, “Pasé antes por delante de tu casa y vi que el cartero trataba de entregar un paquete. Pero nadie abrió la puerta, de modo que se llevó el paquete de vuelta a la camioneta”. “No, estás equivocado”, dice usted. “Él sí entregó el paquete. Era una ropa que encargué por catálogo”». Evidentemente se ha puesto de manifiesto una contradicción. Ambos observadores saben que hay algo incompatible. De hecho, ni siquiera es esencial que usted salga físicamente de casa para que se revele la contradicción. La misma conversación mantenida por teléfono pondría de manifiesto la misma contradicción.

Pero un horizonte de agujero negro es fundamentalmente diferente de la entrada de su casa. Usted podría decir que es una puerta de dirección única: se puede entrar pero no se puede salir. Por la propia definición de un horizonte, ningún mensaje puede pasar del interior al exterior del horizonte. El observador fuera del horizonte está permanentemente aislado de alguien o algo que esté en el interior, no por gruesas paredes sino por las leyes básicas de la física. El paso final que lleva a la contradicción —combinar las dos

observaciones supuestamente incompatibles en una única observación— es físicamente imposible.

Me habría gustado añadir algunos comentarios filosóficos acerca de cómo la evolución ha creado una imagen mental que guía nuestras acciones cuando se trata de cuevas, tiendas de campaña, casas y puertas, pero que nos confunde cuando se trata de agujeros negros y horizontes. Pero esos comentarios habrían sido ignorados. Los físicos quieren hechos, ecuaciones y datos, no filosofía y psicología pop evolutiva.

Stephen sonreía mientras yo daba el mensaje, pero yo dudaba bastante que él lo aprobara.

A continuación utilicé la analogía de las gotas de tinta que caen en un puchero con agua para ilustrar cómo el horizonte estirado puede absorber y luego revolver la información; y cómo, finalmente, igual que el agua se evapora de un puchero, la información es eventualmente extraída en la radiación de Hawking. Para alguien fuera del agujero negro, todo es bastante normal —los agujeros negros y las bañeras no son tan diferentes—, o eso afirmaba yo.

La audiencia estaba inquieta; se levantaron algunas manos para presentar objeciones. Sabían cómo se evaporaba la información de las bañeras, pero faltaba algo. ¿Qué pasa con alguien que cae en el agujero negro? Cuando llega al horizonte estirado, ¿se derrite repentinamente? ¿No violaría eso el principio de equivalencia?

Así que pasé a la otra mitad de la historia: «Para quien cae en el agujero negro, el horizonte parece espacio vacío perfectamente normal. No hay horizonte estirado, no hay objetos microscópicos

increíblemente calientes, no hay horizonte estirado en ebullición, nada fuera de lo ordinario: sólo espacio vacío». Expliqué además por qué no podía detectarse ninguna contradicción.

No estoy seguro de si Stephen seguía sonriendo o no. Y como supe después, la mayoría de los relativistas en la audiencia pensaban que yo había perdido la cabeza.

Ya durante la conferencia era obvio que yo había captado la atención de la audiencia. Gerard, que puede ser un personaje espinoso, estaba sentado en la primera fila sacudiendo la cabeza y frunciendo el ceño. Yo sabía que de todos los presentes él era el que mejor entendía lo que yo estaba diciendo. También sabía que él estaba de acuerdo. Pero él quería que se dijera a su particular manera.

Yo estaba muy interesado en las reacciones de la gente de Santa Bárbara —Giddings, Horowitz, Strominger y, especialmente, Polchinski. No podía sacar ninguna impresión desde el estrado, pero más tarde descubrí que no les habían afectado en absoluto mis argumentos.

Había dos oyentes bien dispuestos. Después de mi conferencia, en el almuerzo en la cafetería de la facultad, John Preskill y Don Page se acercaron y se sentaron junto a mí. El hipercinético Don tenía una bandeja abarrotada con una cantidad de comida sorprendente, incluidos tres postres gigantescos. (Estaba muy claro de dónde procedía su energía). Don puede hablar en voz alta y frenéticamente, pero también escucha muy bien, y ese día era oyente. Yo ya sabía que a él le gustaba la idea de que los agujeros

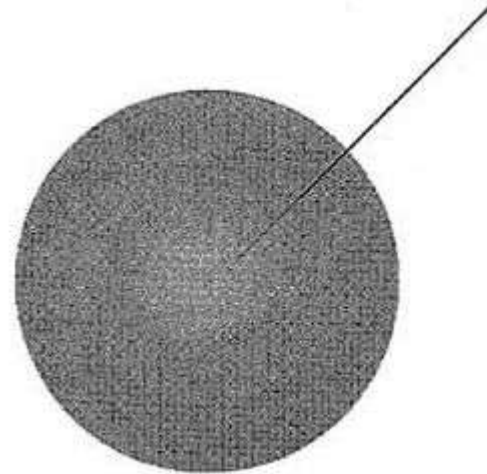
negros son objetos más o menos ordinarios cuando se trata de información. Lo había dicho públicamente en su propia y enérgica charla.

En comparación, John Preskill es más reservado, aunque nada cerrado. Un hombre espigado con un fino sentido del humor, John tiene aproximadamente la misma edad que Joe Polchinski y era entonces profesor en el Instituto de Tecnología de California. Caltech había sido el hogar de dos de los más grandes físicos del siglo, Murray Gell-Mann y Dick Feynman. El propio John era un físico muy respetado, con reputación de gran honestidad intelectual. Como Sidney Coleman, John era una de esas personas cuya claridad de ideas le daba una especial autoridad moral. Mis conversaciones con John han sido siempre gratificantes. La que tuvo lugar ese día fue reveladora. Pero antes de que pueda explicarla, tengo que decirle algo más sobre la complementariedad de agujero negro.

Mirando el horizonte con el microscopio de Heisenberg

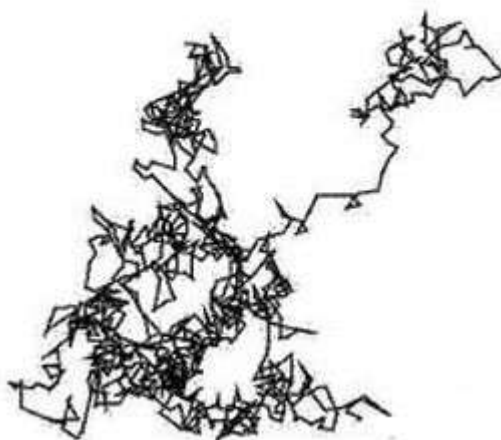
Un simple átomo de hidrógeno cae en un agujero negro gigantesco. Primero, la imagen ingenua: el minúsculo átomo sigue una trayectoria y atraviesa el horizonte, perfectamente intacto. En física clásica, el átomo cruza el horizonte en un punto muy bien definido, un punto no mayor que el propio átomo. Eso parece correcto porque, según el principio de equivalencia, se supone que no ocurre nada violento cuando el punto de hidrógeno pasa el punto de no retorno.

Pero eso es demasiado ingenuo. Según la complementariedad de agujero negro, el observador que está fuera ve que el átomo entra en una capa muy caliente (el horizonte estirado), igual que una partícula que cae en un puchero de agua caliente. Cuando cae en la capa de materia caliente, es bombardeado desde todos lados por grados de libertad violentamente energéticos. Primero, el átomo recibe un golpe desde la izquierda, luego desde arriba, luego desde la izquierda de nuevo, luego desde la derecha. Deambula como un marinero borracho. Este movimiento browniano se llama *camino aleatorio*.

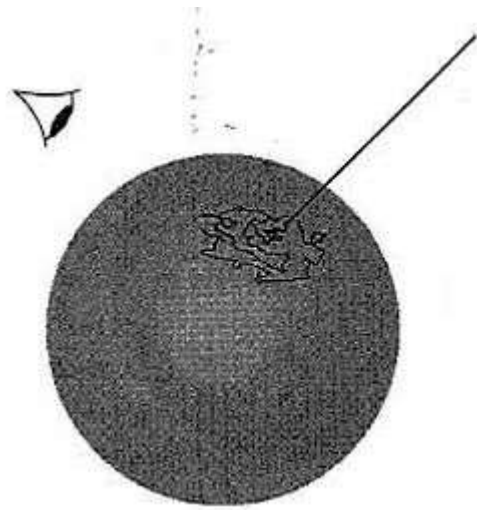


Cabe esperar que un átomo haga exactamente lo mismo cuando cae en los grados de libertad calientes que forman un horizonte estirado, es decir, deambular por todo el horizonte.

Movimiento browniano



Pero incluso eso es demasiado simple. El horizonte estirado está tan caliente que el átomo será reventado —*ionizado* es el término técnico— y el electrón y el protón deambularán por separado por el horizonte.

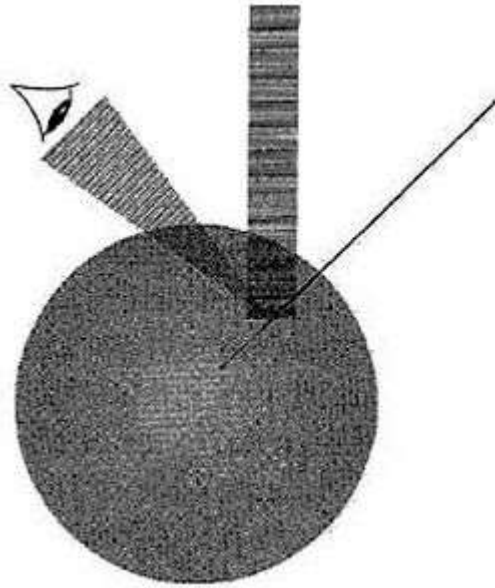


Incluso los electrones y los quarks pueden ser descompuestos en elementos más básicos. Note que se supone que todo esto sucede inmediatamente antes de que el átomo cruce el horizonte. Creo que fue Don, durante su tercer postre, quien preguntó oportunamente si esto planteaba una dificultad para la complementariedad. Parecía haber dos descripciones del átomo, incluso antes de cruzar el horizonte. En una, el átomo está ionizado cuando deambula por el horizonte. Pero en la otra, el átomo cae sin ser perturbado, directo hacia un punto del horizonte. ¿Por qué no podría alguien del exterior observar el átomo y ver que no le está pasando nada

violento? Eso refutaría la complementariedad de agujero negro de una vez por todas.

Cuando empecé a explicarlo, se hizo obvio rápidamente que John Preskill se había planteado la misma pregunta y había llegado a la misma conclusión que yo. Ambos empezamos señalando que el átomo no podía ser ionizado hasta que alcanzara un punto en donde la temperatura cerca del horizonte fuera de unos 100.000 grados. Eso sólo sucede muy cerca del horizonte, a aproximadamente una millonésima de centímetro. Ahí es dónde tendríamos que observar el electrón. Eso no suena muy difícil; una millonésima de centímetro no es terriblemente pequeña.

¿Qué haría Heisenberg? La respuesta, por supuesto, es que él sacaría su microscopio e iluminaría el átomo con luz de la longitud de onda apropiada. En este caso, para resolver el átomo cuando está a menos de una millonésima de centímetro del horizonte, necesitaría fotones de una longitud de onda de 10^{-6} centímetros. Llegamos ahora a la trampa habitual: un fotón de una longitud de onda tan pequeña tiene mucha energía; de hecho, tiene tanta energía que cuando golpee al átomo lo ionizará. En otras palabras, cualquier intento por demostrar que el átomo no había sido ionizado por el horizonte estirado caliente tendría el contraefecto de ionizar el átomo. Yendo aún más lejos, argumentábamos que cualquier intento de ver si el electrón y el protón siguen un camino aleatorio sobre el horizonte rompería las partículas y las dispersaría por todo el horizonte.



Mi recuerdo de la discusión no es perfecto, pero recuerdo cómo Don se animaba y decía, con su voz estentórea, que yo no había engañado cuando lo había llamado Complementariedad. Era exactamente el tipo de cosa de la que habían hablado Bohr y Heisenberg. De hecho, refutar experimentalmente la complementariedad de agujero negro era muy parecido a refutar el principio de incertidumbre: el propio experimento creaba el tipo de incertidumbre para cuya refutación había sido diseñado.

Hablamos sobre lo que sucedería cuando el átomo se aproximara aún más al horizonte. El microscopio de Heisenberg tendría que utilizar cuantos de energía aún mayor. Finalmente, para seguir al átomo hasta una longitud de Planck del horizonte, tendríamos que golpearlo con fotones de energía aún mayores que la energía de Planck. Nadie sabía nada de cómo serían tales colisiones. Ningún acelerador en el mundo ha acelerado nunca partículas a una

energía próxima a la de Planck. John convirtió su idea en un principio:

Cualquier demostración teórica de que la complementariedad de agujero negro lleva a una contradicción observable dependerá inevitablemente de hipótesis no garantizadas sobre la «física más allá de la escala de Planck»; en otras palabras, de hipótesis sobre la Naturaleza en un dominio mucho más allá de nuestra experiencia.

Luego Preskill planteó una cuestión que me preocupó. Supongamos que se dejara caer un bit de información en un agujero negro. Según mi punto de vista, alguien en el exterior podría recoger la radiación de Hawking y finalmente recuperar ese bit. Pero supongamos que después de recoger el bit, él saltara al agujero negro, llevando el bit con él. ¿No habría dos copias del bit en el interior? Sería como si después de recibir el paquete del cartero, usted se quedara en casa, y su amigo entrara en su casa. ¿No habría una contradicción cuando los observadores se encontraran y compararan sus notas en el interior?

La pregunta de John me sobresaltó. Yo nunca había pensado en esa posibilidad. Si alguien en el interior descubriera dos copias del mismo bit, eso sería una violación del principio de imposibilidad de fotocopiadora cuántica. Aquí estaba el más serio desafío para la complementariedad de agujero negro con el que había tropezado. La respuesta, aunque tardaría varias semanas en entenderla, fue dada en parte por el propio Preskill. Él especuló con que quizá las dos

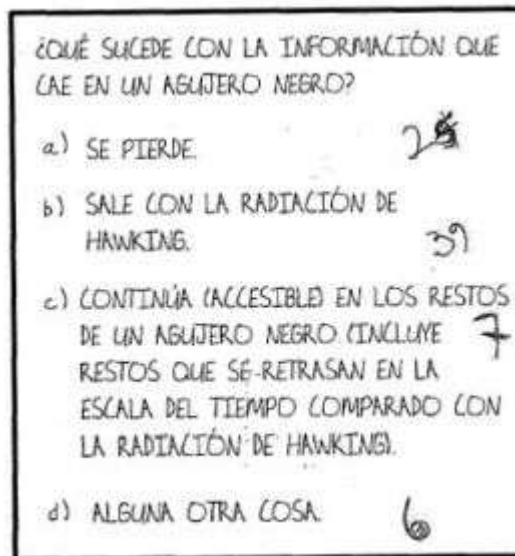
réplicas no podrían encontrarse antes de aplastarse en la singularidad. La física en la vecindad de la singularidad está en las profundidades de la misteriosa *terra incognita* de la gravedad cuántica. Eso nos permitiría sortear el problema. El caso es que las ideas de Don Page iban a desempeñar también un papel central en desactivar la bomba inicial de Preskill.

La discusión terminó abruptamente cuando alguien anunció que la próxima conferencia estaba a punto de empezar. Quizá fuera la última conferencia de la reunión y no tengo ni idea de quién la dio o de qué trataba. Yo estaba demasiado preocupado por la pregunta de John para concentrarme. Pero antes de la clausura de la conferencia, un anuncio de uno de los organizadores me sacó de mis pensamientos. Joe Polchinski se levantó y dijo que iba a hacer una encuesta. La pregunta era: «¿Piensa usted que la información se pierde cuando se evapora un agujero negro como mantiene Hawking? ¿O piensa que se recupera como afirman 't Hooft y Susskind?». Sospecho que antes de la reunión el voto se habría inclinado notablemente hacia la opinión de Hawking. Tenía mucha curiosidad por ver si la gente en la reunión había cambiado de idea. Se pidió a los participantes que votaran por una de las tres opciones habituales, más una cuarta. Estas son las opciones, parafraseadas:

1. Opción de Hawking: la información que cae en un agujero negro se pierde irremediabilmente.
2. Opción de 't Hooft y Susskind: la información sale escupida entre los fotones y demás partículas en la radiación de Hawking.

3. La información queda atrapada en minúsculos remanentes de tamaño de Planck.
4. Alguna otra cosa.

Con votación a mano alzada, Joe registró el resultado en la pizarra en la pared frontal de la sala. Alguien fotografió la pizarra para la posteridad. Aquí está, cortesía de Joe.



Resultado final:

- 25 votos a favor de la pérdida de información.
- 39 votos a favor de que la información sale con la radiación de Hawking.
- 7 votos a favor de los remanentes.
- 6 votos a favor de alguna otra cosa.

La victoria momentánea —39 votos a favor de lo que de hecho era el principio de complementariedad de agujero negro, frente a sólo 38 de las demás alternativas combinadas— no era tan satisfactoria como podía parecer. ¿Cuál sería una victoria real 45 a 32, 60 a 17? ¿Realmente importaba lo que pensaba la mayoría? Se supone que la ciencia, a diferencia de la política, no está gobernada por la opinión pública.

Poco antes de la conferencia de Santa Bárbara había leído el libro de Thomas Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*. En general, como la mayoría de los físicos, no estoy muy interesado en lo que opinan los filósofos sobre el modo en que funciona la ciencia, pero las ideas de Kuhn parecían dar en el blanco; consiguieron centrar mis propias ideas borrosas sobre cómo la física había avanzado en el pasado y, más importante, cómo esperaba yo que estaba progresando en 1993. La visión de Kuhn era que el progreso normal de la ciencia —la recopilación experimental de datos, la interpretación de dichos datos por el uso de modelos teóricos, la resolución de ecuaciones— está ocasionalmente interrumpida por importantes cambios de paradigma. Un cambio de paradigma no es más que la sustitución de una visión del mundo por otra. Aparecen modos de pensamiento totalmente nuevos que toman el lugar de los marcos conceptuales previos. El principio de selección natural de Darwin fue un cambio de paradigma; los cambios de espacio y tiempo por espacio-tiempo y luego un espacio-tiempo elástico y flexible fueron cambios de paradigma; también lo fue, por supuesto,

la sustitución del determinismo clásico por la lógica de la mecánica cuántica.

Los cambios de paradigma científico no son como los cambios de paradigma en arte o en política. Los cambios de opinión en arte o en política son en realidad sólo eso: cambios de opinión. Por el contrario, no habrá nunca una vuelta de las leyes de movimiento de Newton a la mecánica de Aristóteles. Dudo mucho que cambiemos nuestras ideas sobre la superioridad de la teoría de la relatividad general sobre la teoría de la gravitación de Newton cuando se trata de hacer predicciones precisas sobre el Sistema Solar. En ciencia, el progreso —la progresión de los paradigmas— es real.

Por supuesto, la ciencia es un asunto humano, y durante las penosas luchas por nuevos paradigmas, las opiniones y las emociones pueden ser tan volátiles como en cualquier otra empresa humana. Pero de algún modo, cuando todas las opiniones han sido filtradas por el método científico, quedan algunos pequeños núcleos de verdad. Pueden ser mejorados, pero como regla, no son revertidos.

Yo sentía que la guerra de los agujeros negros era una lucha clásica por un nuevo paradigma. El hecho de que la complementariedad de agujero negro hubiera ganado un sondeo de opinión por un voto no era prueba de ninguna victoria real. De hecho, las personas en las que más quería influir —Joe Polchinski, Gary Horowitz, Andy Strominger y sobre todo Stephen— habían votado con la oposición. En las semanas que siguieron, Lárus Thorlacius y yo nos pusimos codo con codo y descubrimos la respuesta a la pregunta de John

Preskill. Nos llevó algún tiempo, pero estoy seguro de que si mi conversación con Preskill y Page hubiera durado media hora más, lo habríamos resuelto allí mismo. De hecho, pienso que John había dado la mitad de la respuesta. Dicho de forma simple, se necesita un tiempo para que un bit de información sea reirradiado fuera de un agujero negro. John había especulado que para cuando un observador exterior pudiera recuperar el bit y saltar al interior del agujero negro, haría tiempo que el bit original habría dado en la singularidad. La única pregunta era cuánto tiempo se tarda en recuperar un bit a partir de la radiación de Hawking que se evapora. Lo curioso es que la respuesta ya había sido dada en un artículo extraordinario que había salido sólo un mes antes de la conferencia de Santa Bárbara. Lo que el artículo implicaba —aunque sin decirlo explícitamente— era que para recuperar un simple bit de información habría que esperar hasta que fueran irradiados la mitad de los fotones de Hawking. Dado el ritmo muy lento al que los agujeros negros irradian fotones, se necesitarían 10^{68} años —un tiempo muchísimo mayor que la edad del universo— para irradiar la mitad de los fotones de un agujero negro de masa estelar. Pero se necesitaría sólo una fracción de segundo para que el bit original se aniquilara en la singularidad. Obviamente, no había posibilidad de capturar el bit en la radiación de Hawking, y luego saltar dentro y compararlo con el primer bit. La complementariedad de agujero negro estaba a salvo. ¿El autor del brillante artículo? Don Page.

Capítulo 16

¡Espere! Invierta el recableado

En cierta ocasión, durante los años sesenta, fui a ver una obra que se representaba en un pequeño teatro de vanguardia en Greenwich Village. Un componente importante de la obra —una astracanada— consistía en que la audiencia participara en los entreactos reemplazando a los tramoyistas.

A una mujer le pidieron que moviera una silla al fondo del escenario, pero en el momento en que la tocó, se deshizo en un montón de astillas. Otro tenía que agarrar un maletín por el asa, pero el maletín no se movía. Mi tarea consistía en levantar una roca de dos metros para dársela a alguien del primer piso. Sólo para seguir la broma, puse mis brazos a su alrededor e intenté levantarla con todas mis fuerzas. Experimenté un momento de disonancia cognitiva cuando la roca se elevó con tanta facilidad como si sólo pesara unos gramos. Era una cáscara fina y hueca de cartón piedra. La relación que establece nuestro cerebro entre el tamaño de un objeto y su peso debe ser uno de esos instintos cableados, una parte de nuestro grokador de física. Equivocarse sistemáticamente indicaría probablemente una grave lesión cerebral... a menos que la persona resultase ser un físico cuántico.

Uno de los grandes trabajos de recableado que siguieron a los descubrimientos de Einstein en 1905 requería deshacer la idea instintiva de que *lo grande es pesado, lo pequeño es ligero* y sustituirla por exactamente lo contrario: *lo grande es ligero, lo*

pequeño es pesado. Como sucede con tantas otras cosas, fue Einstein quien tuvo la primera sospecha de esta inversión de la lógica al modo *Alicia en el País de las Maravillas*. ¿Qué estaba fumando entonces? Muy probablemente, sólo su pipa. Como siempre, las conclusiones de más largo alcance de Einstein salieron de los más simples experimentos imaginarios que hacía dentro de su cabeza.

La increíble caja de fotones menguante

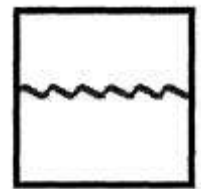
Este experimento mental concreto empieza con una caja ajustable —vacía, salvo por algunos fotones—

que puede hacerse más grande o más pequeña a voluntad. Las paredes interiores son espejos



perfectamente reflectantes, de modo que los fotones atrapados en la caja rebotan de un lado a otro entre las superficies especulares y no pueden escapar.

Una onda confinada en una región de espacio cerrada no puede tener una longitud de onda mayor que el tamaño de la región. Trate de imaginar una onda de diez metros que encaje en una caja de un metro.



No tiene sentido. Una onda de un centímetro, sin embargo, encajaría cómodamente en la caja.

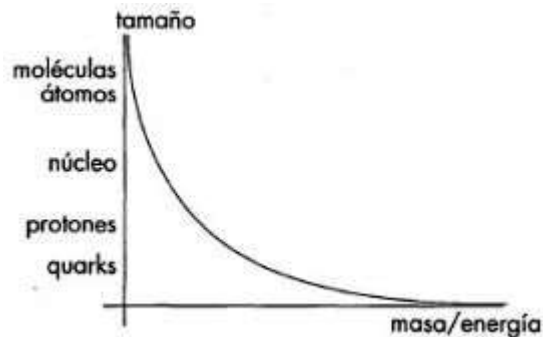
Einstein imaginó que la caja se hace cada vez más pequeña, mientras los fotones siguen atrapados en su interior. A medida que la caja se contrae, la longitud de onda del fotón no puede

permanecer invariable. La única posibilidad es que la longitud de onda de cada fotón se contraiga junto con la caja. Finalmente, la caja se hará microscópicamente pequeña y estará llena de fotones de muy alta energía, pues su longitud de onda es muy corta. Una contracción adicional de la caja aumentará la energía aún más.

Pero recordemos la más famosa ecuación de Einstein, $E=mc^2$. Si aumenta la energía en la caja, también lo hace la masa. Así, cuanto *más pequeña* se hace la caja, *más aumenta* su masa. Una vez más, hay que darle la vuelta a la intuición ingenua. Los físicos tendrían que reaprender las reglas: lo pequeño es pesado, y lo grande es ligero.

La relación entre tamaño y masa se manifiesta de otra manera. La Naturaleza parece estar construida jerárquicamente; cada nivel de estructura comprende objetos más pequeños. Así, las moléculas están hechas de átomos; los átomos de electrones, protones y neutrones; los protones y neutrones de quarks. Estas capas de estructura fueron descubiertas por los científicos haciendo chocar partículas contra átomos y viendo lo que sale. En cierto sentido no es tan diferente de la observación ordinaria, donde se hace rebotar luz (fotones) en objetos y luego se concentra en una película o en la retina de un ojo. Pero como hemos visto, para sondear tamaños muy pequeños debemos utilizar fotones (u otras partículas) de energía muy alta. Obviamente, durante el tiempo en que un átomo está siendo sondeado por un fotón muy energético, debe concentrarse mucha masa —al menos para los niveles de la física de partículas elementales— en un pequeño espacio.

Hagamos una gráfica para mostrar la relación inversa entre tamaño y masa/energía. En el eje vertical representamos la escala de tamaño que intentamos sondear. En el eje horizontal representamos la masa/energía del fotón necesaria para resolver el objeto.



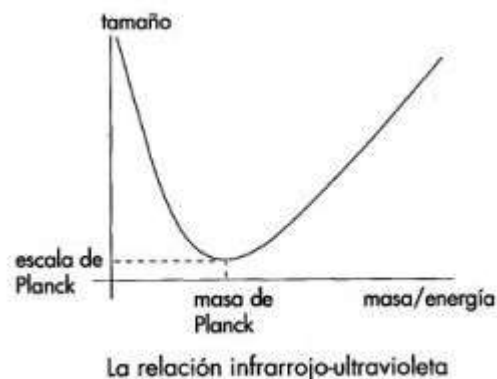
La pauta es clara: cuanto más pequeño es el objeto, mayor es la masa/energía necesaria para verlo. Cablearse para esta relación inversa entre tamaño y masa/energía era algo que todo estudiante de física tenía que hacer durante la mayor parte del siglo XX.

La caja de fotones de Einstein no era una anomalía. La idea de que más pequeño significa más masivo impregna la moderna física de partículas elementales. Pero, irónicamente, el siglo XXI promete deshacer ese cableado.

Para ver por qué, imagine que queremos determinar qué existe, si existe algo, en una escala un millón de veces más pequeña que la longitud de Planck. Quizá la estructura jerárquica de la Naturaleza continúa a esa profundidad. La estrategia estándar del siglo XX sería sondear algún blanco con un fotón de un millón de veces la energía de Planck. Pero esta estrategia tendría contraefectos.

¿Por qué lo digo? Aunque probablemente nunca seremos capaces de acelerar partículas a la energía de Planck, y mucho menos a una energía un millón de veces mayor, ya sabemos lo que sucedería si pudiéramos hacerlo. Cuando se amontona tanta masa en un espacio minúsculo, se formará un agujero negro. Estaremos frustrados por el horizonte del agujero negro, que ocultará en su interior todo lo que estamos tratando de detectar. Cuando tratemos de ver distancias cada vez más pequeñas aumentando la energía del fotón, el horizonte se hará cada vez mayor, y ocultará cada vez más: otra Trampa-22.

¿Cuál es entonces el resultado de la colisión? Radiación de Hawking; eso es todo. Pero cuando el agujero negro se hace más grande, la longitud de onda de los fotones de Hawking aumenta. La imagen nítida de minúsculos objetos subplanckianos queda reemplazada por una imagen cada vez más borrosa hecha por fotones de longitud de onda larga. Por eso, lo más que podemos esperar es que cuando aumente la energía de la colisión, sólo redescubriremos la Naturaleza a una escala mayor. Así, la verdadera gráfica tamaño-frente-a-energía tendrá este aspecto:



Las cosas tocan fondo en la escala de Planck; no podemos detectar nada más pequeño. Más allá de eso, el nuevo cableado es el mismo que el cableado preindustrial grande = pesado. Así, la marcha adelante del reduccionismo —la idea de que las cosas están hechas de cosas más pequeñas— debe terminar en la escala de Planck.

Los términos *ultravioleta* (UV) e *infrarrojo* (IR) han tomado un significado en física más allá de sus implicaciones originales, que tenían que ver con luz de corta y larga longitud de onda. Debido a la relación del siglo XX entre tamaño y energía, los físicos suelen utilizar las palabras para denotar energías altas (UV) y bajas (IR). Pero el nuevo cableado lo mezcla todo: más allá de la masa de Planck, energía más alta significa tamaño más grande, y energía más baja significa tamaño menor. La confusión se refleja en la terminología: la nueva tendencia que iguala gran tamaño con gran energía se ha llegado a conocer de forma algo confusa como la *relación infrarrojo-ultravioleta*⁶⁹.

Fue, en parte, la falta de comprensión de la relación infrarrojo-ultravioleta lo que confundió a los físicos sobre la naturaleza de la información que cae en un horizonte. En el capítulo 15 imaginábamos que utilizábamos el microscopio de Heisenberg para observar un átomo que cae hacia un agujero negro. A medida que avanza el tiempo y el átomo se acerca cada vez más al horizonte, se necesitan fotones de energía cada vez mayores para resolver el átomo. Finalmente, la energía se hará tan grande que la colisión del

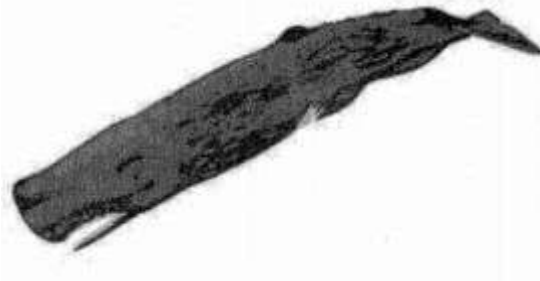
⁶⁹ Yo soy el culpable de esta horrible terminología. La expresión *relación infrarrojo-ultravioleta* fue utilizada por primera vez en 1998 en un artículo que escribí con Edward Witten.

fotón y el átomo creará un gran agujero negro. Entonces la imagen tendrá que ser ensamblada a partir de la radiación de Hawking de longitud de onda larga. El resultado es que en lugar de hacerse más nítida, la imagen del átomo se emborronará cada vez más hasta el punto de que el átomo parecerá dispersarse sobre todo el horizonte. Desde el exterior parecerá, por utilizar una analogía ahora familiar, como una gota de tinta que se disuelve en una bañera de agua caliente.

La complementariedad de agujero negro, incluso si era escandalosa, parecía internamente consistente. En 1994 yo quería agitar a Hawking y decir, «¡Mira Stephen, estás pasando por alto la esencia de tu propio trabajo!». Pronto lo intenté, pero sin éxito. El intento, que duró todo un mes, tuvo a la vez humor y *pathos*. Hagamos una pausa en la física mientras describo mis frustraciones en esa época.

Capítulo 17

Ahab en Cambridge



Un minúsculo punto blanco había crecido hasta llenar todo mi campo visual. Pero a diferencia de la obsesión de Ahab, la mía no era una ballena de cien toneladas; era un físico teórico de cincuenta kilos en una silla de ruedas motorizada. Mis pensamientos raramente se apartaban de Stephen Hawking y sus ideas equivocadas sobre la destrucción de la información en el interior de los agujeros negros. Para mí, ya no había ninguna duda sobre la verdad, pero me consumía la necesidad de hacer que la viera Stephen. No sentía deseos de arponearle, ni siquiera humillarle; sólo quería hacerle ver los hechos como yo los veía. Quería que viese las profundas implicaciones de su propia paradoja.

Lo que más me molestaba era la facilidad con la que tantos expertos —básicamente todos o casi todos los relativistas generales— aceptaban las conclusiones de Stephen. Me resultaba difícil entender que él y los demás pudieran ser tan complacientes. La afirmación de Stephen de que había una paradoja y que podría anunciar una revolución era correcta. Pero ¿por qué él y los demás pasaban de ella?

Y lo que es aún peor, yo pensaba que Hawking y los relativistas generales estaban derribando un pilar de la ciencia sin ofrecer nada que lo reemplazase. Stephen lo había intentado y fracasado con su matriz- S —cuando se utilizaba, llevaba a desastrosas violaciones de la conservación de la energía— pero todos sus seguidores se contentaban con decir, «Hum, la información se pierde en la evaporación de un agujero negro», y lo dejaban en eso. Yo estaba irritado por lo que me parecía pereza intelectual y una abdicación de la curiosidad científica.

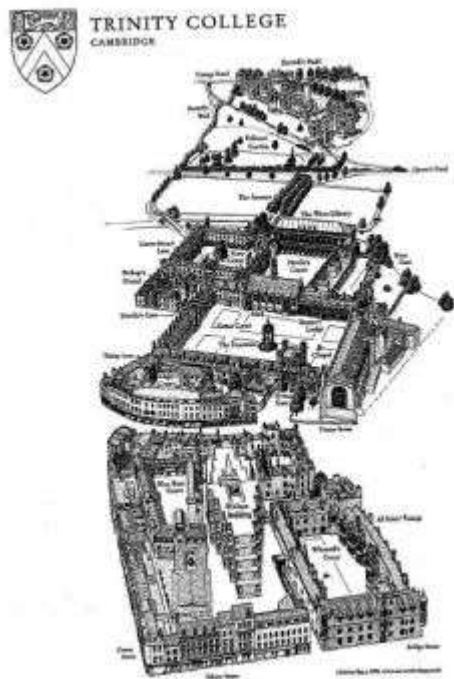
El único alivio para mi obsesión era correr, a veces veinticinco kilómetros o más, por las colinas de Palo Alto. Para despejarme me dedicaba a perseguir a quienquiera que fuese unos metros por delante de mí, hasta que le adelantaba. Entonces era Stephen quien aparecía delante.

Él invadía mis sueños. Una noche en Texas, soñé que Stephen y yo estábamos apretados en una silla de ruedas mecanizada. Yo luchaba con todas mis fuerzas por echarle de la silla. Pero «Stephen la Masa» era increíblemente fuerte. Me agarraba de una manera que no me dejaba respirar. Luchábamos hasta que me desperté empapado en sudor.

¿La cura para mi obsesión? Como Ahab, tendría que ir al enemigo y cazarle donde él moraba. Así que en 1994 acepté una invitación para visitar el recién creado Instituto Newton en la Universidad de Cambridge. En junio, Stephen estaría presidiendo la corte entre un grupo de físicos, a la mayoría de los cuales yo conocía bien pero no se contaban entre mis aliados: Gary Horowitz, Gary Gibbons, Andy

Strominger, Jeff Harvey, Steve Giddings, Roger Penrose, Shing-Tung Yau y otros pesos pesados. Mi único aliado, Gerard 't Hooft, no estaría allí.

Yo no estaba ansioso por volver a visitar Cambridge. Veintitrés años antes había tenido allí dos experiencias que me habían hecho sentirme herido e irritado. Yo era joven, desconocido, y aún sufría las inseguridades de ser un académico procedente de la clase obrera. Una invitación para cenar en la alta mesa del Trinity College de Cambridge hizo poco por mitigarlas.



Sigo sin saber lo que significa ser invitado a la alta mesa. No sé si era un honor, y si lo era, en honor de quién o qué. ¿O era sólo un lugar donde comer? En cualquier caso, mi anfitrión, un afable catedrático llamado John Polkinghorne, me llevó a un salón

medieval donde colgaban retratos de Isaac Newton y otros gigantes. Los estudiantes de grado se sentaban en el nivel más bajo, vestidos con sus togas académicas. El claustro de ciencias precedía a la alta mesa, un estrado elevado en un extremo de la sala. La comida era servida por camareros que iban mucho mejor vestidos que yo, y a ambos lados tenía caballeros académicos que murmuraban en un lenguaje que apenas entendía. A mi izquierda, un antiguo *sir* británico estaba sorbiendo su sopa. A mi derecha, un distinguido académico estaba contando una historia acerca de un invitado norteamericano que había estado allí tiempo atrás. Parece que este americano, que carecía de la sofisticación que se esperaba de un hombre de Cambridge, había hecho una ridícula elección de vino.

En cuanto a mi conocimiento de vinos, estoy razonablemente seguro de que puedo distinguir el tinto del blanco con los ojos cerrados. Estoy incluso más seguro de que puedo distinguir el vino de la cerveza. Pero más allá de eso, mi paladar me falla. Apenas podía dejar de sentir que yo era el centro de la historia. El resto de la conversación, siendo sólo de interés para Cambridge, se me pasó. Me quedé disfrutando de una comida insípida (pescado hervido cubierto con pasta rayada), completamente aislado de cualquier conversación.

Otro día, mi anfitrión me llevó a pasear por el Trinity College. Un largo pasillo de césped, muy bien cuidado, ocupaba un lugar de honor delante de la entrada principal de uno de los edificios. Advertí que nadie cruzaba por la hierba. Un pasillo alrededor del jardín era la única ruta permitida. Por eso me sorprendió cuando el profesor

Polkinghorne me cogió del brazo y empezamos a cruzar en diagonal. ¿Qué significado tenía esto? ¿Estábamos atravesando un terreno sagrado? La respuesta era simple: los catedráticos, de los que había muchos menos en las universidades británicas que en sus homologas norteamericanas, disfrutaban del antiguo privilegio de cruzar por la hierba. Nadie más, o al menos nadie de un rango inferior, estaba autorizado para hacerlo.

Al día siguiente dejé el College sin ningún acompañante para volver a mi hotel. Con treinta y un años, era joven para ser un catedrático, pero lo era. Naturalmente supuse que esto me daba derecho a cruzar por la hierba. Pero cuando estaba a mitad de camino, un caballero rechoncho, que llevaba lo que parecía un chaqué y un bombín, salió de uno de los edificios y me exigió airadamente que saliera de la hierba de inmediato. Protesté diciendo que era un catedrático norteamericano. Mi protesta no tuvo efecto.

Veintitrés años después —barbado, más viejo y quizá con un aspecto un poco más intimidatorio— intenté de nuevo la hazaña. Esta vez crucé sin ningún problema. ¿Había cambiado Cambridge? Realmente no lo sabía. ¿Había cambiado yo? Sí. Las cosas que dos décadas antes me habían ofendido como esnobismo clasista —la alta mesa, los privilegios especiales sobre la hierba— ahora sólo me parecían hospitalidad agradable y quizá un poco de excentricidad británica. Mi vuelta a Cambridge me sorprendió de varias maneras. Aparte del hecho de que mi disgusto por las idiosincrasias de la universidad se había transformado en algo parecido a la diversión,

la notoriamente mala comida británica había mejorado decididamente. Encontré que me gustaba Cambridge.

En mi primer día allí me desperté muy temprano. Decidí pasear por la ciudad hasta mi destino eventual: el Instituto Newton. Dejé a mi mujer, Anne, en nuestro apartamento en Chesterton Road y caminé junto al río Cam, cerca de los embarcaderos en los que se guardaban las barcas para las competiciones de remo, y por Jesus Green. (Durante mi primera visita, me había quedado intrigado, incluso irritado, por las fuertes raíces religiosas de la cultura de Cambridge).

Caminé hasta Bridge Street y crucé el río Cam. ¿Cam? ¿Bridge? ¿Cambridge? ¿Era posible que estuviese en el lugar del puente original, el que había dado su nombre a la gran universidad? Probablemente no, pero era divertido especular.

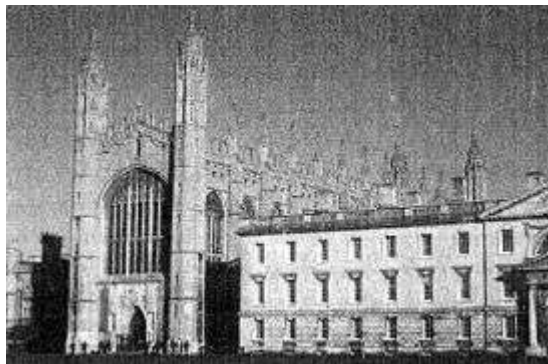
Un banco en un parque cercano estaba ocupado por un anciano caballero, elegante y con aspecto de «científico», con un largo bigote con las puntas curvadas hacia arriba. ¡Era igual que Ernest Rutherford, el descubridor del núcleo atómico! Me senté y entablé conversación. Evidentemente no era Rutherford, a menos que hubiera salido de la tumba: Rutherford llevaba muerto casi sesenta años. ¿Quizá un hijo de Rutherford?

Mi compañero de banco estaba muy familiarizado con el nombre de Ernest Rutherford: sabía que era el neozelandés que había descubierto la energía atómica. Pero aunque el parecido era fuerte, él no era un Rutherford. Era más probable que fuera pariente mío, pues se trataba de un cartero judío jubilado con afición por la

ciencia. Su nombre era Goodfriend, probablemente una adaptación al inglés de un apellido Gutefreund de una generación anterior.

Mi paseo temprano me llevó a Silver Street, donde un antiguo edificio albergó en otro tiempo el Departamento de Matemáticas Aplicadas y Física Teórica, el edificio donde John Polkinghorne había sido mi anfitrión. Pero incluso en Cambridge las cosas cambian. Las ciencias matemáticas («maths» en la terminología académica británica) se albergaban ahora en una nueva localización cerca del Instituto Newton.

Entonces vi una estructura que sobresalía en la distancia. Destacaba. Imponía. La capilla del King's College es la casa de Dios en Cambridge. Físicamente domina sobre muchas casas de la ciencia de Cambridge.



¿Cuántas generaciones de estudiantes de ciencias han rezado, o al menos han hecho como que rezaban, en esa catedral? Movidado por la curiosidad, entré en su interior sagrado. En ese ambiente, incluso yo, un científico sin ningún sentimiento religioso, encontraba cierta vaciedad en mi creencia en que no existe nada salvo electrones,

protones y neutrones, en que la evolución de la vida no es más que un juego de ordenador entre los genes más egoístas. «Catedralitis», el respeto que inspira un conjunto de piedras y vidrieras ingeniosamente ensambladas: yo soy casi inmune a ello, aunque no del todo.

Todo esto me traía a la mente algo sobre el mundo académico británico que siempre me había intrigado: la mezcla incongruente de tradiciones científicas y religiosas. Cambridge y Oxford, ambas fundadas por clérigos en el siglo XII, habían abrazado con igual fervor lo que nosotros en Estados Unidos llamamos eufemísticamente las comunidades basadas en la fe y las basadas en la realidad. Y lo que es aún más extraño, parecían hacerlo con una tolerancia intelectual única que me confundía. Tomemos, por ejemplo, los nombres de nueve de los más famosos *colleges* de Cambridge: Jesus College, Christ's College, Corpus Christie College, Magdalene College, Peterhouse, St. Catharine's College, St. Edmund's College, St. John's College y Trinity College. Pero luego están Wolfson College, llamado así en honor a Isaac Wolfson, un judío seglar. Aún más sorprendente es el Darwin College, el mismo Darwin cuyo golpe maestro expulsó a Dios de la ciencia de la vida.

La historia es larga y pintoresca. Isaac Newton hizo más por arrinconar las creencias sobrenaturales que cualquiera antes que él. Inercia (masa), aceleración y una ley de la gravitación universal reemplazaron a la mano de Dios, que ya no era necesaria para guiar a los planetas. Pero como los historiadores de la ciencia del siglo XVII nunca se cansan de recordarnos, Newton era cristiano, y un

apasionado creyente religioso. Dedicó más tiempo, energía y tinta a la teología cristiana que a la física.

Para Newton y sus pares, la existencia de un creador inteligente debió haber sido una necesidad intelectual: ¿cómo, si no, explicar la existencia del hombre? Nada en la visión del mundo de Newton podía explicar la creación, a partir de materia inanimada, de un objeto tan complejo como un ser humano sintiente. Newton tenía razones más que suficientes para creer en un origen divino.

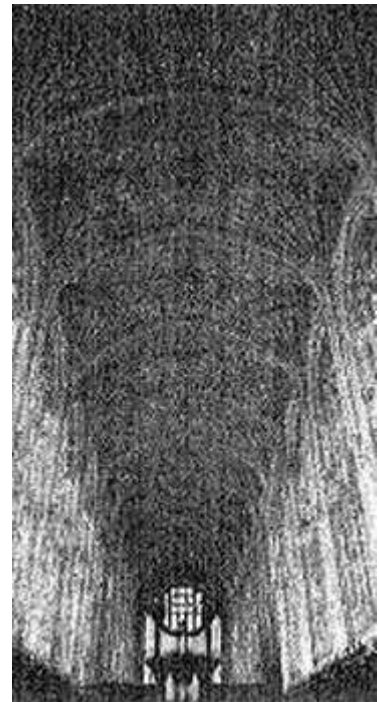
Pero donde Newton falló, tuvo éxito dos siglos más tarde el último (e involuntario) subversivo, Charles Darwin (también un hombre de Cambridge). La idea de Darwin de la selección natural, combinada con la doble hélice de Watson y Crick (descubierta en Cambridge) reemplazaron la magia de la creación por la química y las leyes de la probabilidad.

¿Era Darwin un enemigo de la religión? En absoluto. Aunque había perdido la fe en el dogma cristiano y se consideraba un agnóstico, era un miembro destacado de su parroquia local, así como un íntimo amigo del vicario, el reverendo John Innes.

Por supuesto, no todo fue siempre totalmente amistoso. La historia del debate (sobre la evolución) entre Thomas Huxley y el obispo Samuel («Sam el Jabonoso») Wilberforce tiene sus rudas aristas. El obispo preguntó a Huxley si era su abuela o su abuelo el que había sido mono. Huxley devolvió el cumplido calificando a Wilberforce de prostituta de la verdad. Por lo demás, nadie recibió un tiro, una puñalada y ni siquiera un puñetazo. Todo se hizo en la civilizada tradición británica del debate académico.

¿Y qué pasa hoy? Incluso ahora persiste la refinada coexistencia entre religión y ciencia. John Polkinghorne, quien me había escoltado a través de la hierba, ya no es un catedrático de física. En 1979 renunció a su cátedra para prepararse para el sacerdocio anglicano. Polkinghorne es uno de los defensores destacados de la idea popular de que ciencia y religión están entrando en un período de convergencia perfecta. Afirman que el plan de Dios se expresa a través del extraordinario diseño de las leyes de la Naturaleza. Estas leyes no sólo son extraordinariamente improbables sino que también están exactamente ajustadas para garantizar la existencia de vida inteligente; vida que, dicho sea de paso, puede apreciar a Dios y sus leyes⁷⁰. Hoy, Polkinghorne es uno de los más eminentes hombres de la Iglesia en Gran Bretaña. Sin embargo, no sé si sigue teniendo permiso para cruzar la hierba.

Mientras, el reputado evolucionista de Oxford, Richard Dawkins, dirige la carga contra cualquier convergencia supuesta de ciencia y religión. Según Dawkins, vida, amor y moralidad son una mera representación de una competición mortal, no entre personas, sino entre genes egoístas. El mundo intelectual británico parece suficientemente grande para albergar a Dawkins y Polkinghorne.



⁷⁰ Para mis opiniones sobre el tema, véase mi libro *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*, Little, Brown and Company, Londres, 2005. (Hay trad. cast.: *El paisaje cósmico*, Crítica, Barcelona 2007).

Pero volvamos a la capilla del King's College. Era difícil considerar en términos puramente ópticos la luz de la mañana que se filtraba a través de las vidrieras. Por eso, con un ligero acceso de «catedralitis», me senté en un banco con una buena vista del impresionante interior.

Al poco tiempo se me unió un hombre de aspecto serio —alto, corpulento pero no gordo, con lo que me parecía un porte particularmente poco británico. Su camisa era de un tipo de algodón azul basto que en mi juventud yo hubiera llamado una camisa de trabajo; sus pantalones marrones de pana se sujetaban por unos anchos tirantes, lo que le daba el aspecto de un habitante del oeste americano del siglo XIX. De hecho, yo no estaba tan desencaminado. Su acento era del oeste de Montana, no un anglicano del este.

Una vez que establecimos nuestra común identidad americana, la conversación se orientó a la religión. No, expliqué, yo no estaba allí para rezar. De hecho, yo no era cristiano, sino un hijo de Abraham que había venido a admirar la arquitectura. Él era un contratista de construcción y había entrado en la capilla del King's College para observar la obra. Aunque era un hombre de profundas convicciones religiosas, no estaba seguro de si era apropiado rezar en esta iglesia. Él estaba afiliado a la Iglesia de Jesucristo de los Santos del Último Día. La Iglesia de Inglaterra era fuente de sospechas para él. Yo no veía ninguna razón para disgustarle con mi profundo escepticismo y mi completo rechazo hacia la fe religiosa, que considero una fuerte creencia en poderes sobrenaturales.

Yo no sabía casi nada del mormonismo. Mi única experiencia con esa religión era que en cierta ocasión había tenido como vecinos a una agradable familia mormona. Todo lo que sabía era que los mormones tenían reglas rígidas en contra de beber café, té y Coca-Cola. Mi presunción era que la fe mormona era un producto típico del protestantismo noreuropeo. Por eso me sorprendió cuando mi conocido me dijo que los mormones eran como los judíos. Sin una tierra a la que llamar patria, habían seguido a su propio Moisés a través del desierto, sorteando todos los peligros y sufriendo privaciones concebibles, hasta que finalmente habían llegado a su tierra de leche y miel: la región del Gran Lago Salado en Utah.

Mi conocido se sentó encogido, con los antebrazos descansando en las rodillas abiertas y sus grandes manos entre ellas. La historia que contó no era de una antigüedad nebulosa, sino una historia americana que empezó en torno a 1820. Supongo que debería haber sido familiar para mí, pero no lo era. Aquí están los detalles brutos de lo que puedo recordar, completados con el registro histórico que examiné más tarde.

Joseph Smith nació en 1805. Su madre sufría epilepsia y tenía visiones religiosas. Un día el ángel Moroni llegó a él y le susurró el secreto de unas placas de oro ocultas, antiguas y puras en las que estaban inscritas las palabras de Dios. Estas palabras iban a ser reveladas sólo a Smith, pero había una trampa: las inscripciones estaban escritas en un lenguaje que ninguna persona viva podía descifrar.

Pero Moroni dijo a Joseph que no se preocupara. Él proporcionaría a Joseph un par de mágicas piedras transparentes, un par de gafas sobrenaturales. Las piedras tenían nombres, Urim y Thummim. Moroni dio instrucciones a Joseph para colocar a Urim y Thummim en su sombrero, y así, mirando dentro del sombrero, Joseph podía ver la inscripción mágica revelada en inglés llano.

Mi reacción ante esta historia fue sentarme en silencio como si estuviera pensando profundamente. Supongo que o bien se es un hombre de fe o no se es; y si no se es, una historia de placas de oro, vistas a través de gafas mágicas colocadas en el sombrero de un hombre, es muy divertida. Pero divertida o no, varios miles de creyentes siguieron a Joseph Smith, y más tarde, tras la violenta muerte de Smith a los treinta y ocho años de edad, siguieron a su sucesor, Brigham Young, a través de espantosos peligros y tribulaciones. Hoy, los descendientes religiosos de estos creyentes se cuentan por decenas de millones.

Dicho sea de paso, usted se preguntará qué sucedió con las placas de oro que Joseph descifró con ayuda de Urim y Thummim. La respuesta es que después de traducirlas al inglés, él las perdió.

Ahora bien, Joseph Smith era un hombre muy carismático que tenía mucho atractivo para el sexo opuesto. Esto debe haber sido parte de un plan divino. Dios ordenó a Joseph que se casara y dejara embarazadas a tantas jóvenes como fuera posible. También dijo a Joseph que reuniera a una multitud de seguidores y los llevara a la primera versión de la tierra prometida, un lugar llamado Nauvoo, Illinois. Nada más llegar con sus seguidores a Nauvoo, él

anunció que se iba a presentar como candidato a la presidencia de Estados Unidos. Pero las buenas gentes de Nauvoo eran buenos cristianos —cristianos convencionales— y no les gustaron mucho sus ideas sobre la poligamia. Por eso le mataron de un tiro.

De la misma forma que el manto de Moisés pasó a Josué, la autoridad de Smith pasó a Brigham Young, otro hombre de múltiples amores y muchos hijos. El éxodo mormón empezó con una precipitada salida de Nauvoo. Con el tiempo, Young les llevó a Utah tras un largo, arduo y peligroso viaje.

Yo estaba fascinado, y aún lo estoy, por esta historia. Creo que entonces afectó a mis sentimientos, sin duda completamente injustos, respecto a Stephen y su poderosa influencia carismática sobre muchos físicos. Obsesionado con mi propia frustración, le imaginaba como un flautista de Hamelín dirigiendo una falsa cruzada contra la mecánica cuántica.

Pero esa mañana, ni Stephen ni los agujeros negros estaban en mi mente. La capilla del King's College me había dejado una paradoja científica completamente nueva con la que obsesionarme. No tenía nada que ver con la física, salvo de una manera indirecta. Era una paradoja que tenía que ver con la evolución darwinista. ¿Cómo es posible que los seres humanos hayan desarrollado un impulso tan poderoso para crear sistemas irracionales y sostenerlos con tanta tenacidad? Cabría pensar que la selección darwinista reforzaría una tendencia hacia la racionalidad, filtrada de cualquier disposición genética hacia sistemas de creencias supersticiosas y basadas en la fe. Después de todo, una creencia irracional puede matarle a uno,

como sucedió con Joseph Smith. Sin duda, ha matado a muchos millones. Cabría esperar que la evolución eliminara las tendencias a seguir a líderes inconscientes sobre la base de la fe. Pero parece que lo cierto es todo lo contrario. Esta paradoja científica provocaba mi curiosidad por primera vez en Cambridge. Desde entonces he estado fascinado por ella y he pasado mucho tiempo tratando de explicarla. Aparentemente, durante las pocas semanas que pasé en Cambridge me desvié mucho del tema que me había llevado allí: el comportamiento cuántico de los agujeros negros. Pero no era cierto del todo. Lo que había en el fondo de mi mente era la cuestión de si científicos tales como Hawking, 't Hooft, yo mismo y todos los demás participantes en la guerra de los agujeros negros, podríamos ser víctimas de nuestras propias ilusiones basadas en la fe.

Aquellas semanas en Cambridge fueron problemáticas y llenas de pensamientos melodramáticos. La historia de Ahab y la ballena es ambigua: ¿era la ballena enloquecida la que llevó a Ahab al fondo del mar, o era el enloquecido Ahab quien llevó al débil Starbuck a su final? Y más importante, ¿estaba yo, como Ahab, siguiendo una loca obsesión, o estaba Stephen tentando a los demás con una idea falsa?

Tengo que admitir que hoy encuentro completamente ridícula la idea de Stephen del Flautista de Hamelín o de Stephen el Ermitaño (por el cruzado francés Pedro el Ermitaño) dirigiendo a sus fascinados seguidores a la destrucción intelectual. Evidentemente, la obsesión es una poderosa droga alucinógena.

No pretendo darle la impresión de que pasé varias semanas recorriendo sin objetivo las calles de Cambridge, prisionero de mis oscuros pensamientos. Estaba previsto que diera una serie de charlas sobre complementariedad de agujero negro en el Instituto Newton. Pasé mucho tiempo en el instituto preparando esas charlas y discutiendo diversos puntos con mis colegas escépticos.

Al Newton

Debían ser las 10:00 a. m. cuando dejé la capilla del King's College y salí a la luz del sol de un día de junio. El misterio darwiniano de la fe irracional había perforado su camino en mi cerebro, pero un problema técnico mucho más acuciante requería una solución inmediata: aún tenía que encontrar el Instituto Newton.

Mi mapa prácticamente inútil me sacó del centro de la vieja Cambridge y me llevó hasta un área residencial de aspecto moderno e impersonal. Confiaba en que esto fuera un error; era decepcionante para mi sentimentalidad romántica. Vi una señal que indicaba la dirección hacia Wilberforce Road. ¿Podía ser el mismo Wilberforce, el conocido como «Sam el Jabonoso», que había preguntado a Huxley si era su abuelo o su abuela el que había sido un mono? Quizá la historia no estaba completamente ausente.

De hecho, la verdad era aún mejor. Wilberforce Road debía su nombre al padre de Samuel, el reverendo William Wilberforce. William había desempeñado un papel admirable en la historia británica, al ser uno de los líderes del movimiento abolicionista para eliminar la esclavitud en el Imperio británico.

Finalmente, doblé la esquina de Wilberforce con Clarkson Road. Mi impresión inmediata al ver el Instituto Newton fue de nuevo de decepción. Era un edificio contemporáneo; no feo, sino construido al modo moderno: vidrio, ladrillo y acero.



El Instituto Newton

Pero la decepción se convirtió en admiración en cuanto entré en el edificio. Tenía la arquitectura perfecta para su propósito: discutir e intercambiar ideas —viejas, nuevas y no ensayadas— en debates vigorosos; destripar teorías falsas; y, esperaba yo, enfrentarse al enemigo y derrotarle. Había una zona amplia y muy bien iluminada con muchos sillones cómodos, mesas donde escribir y pizarras en casi todas las paredes. Varios grupos pequeños de personas estaban sentados en torno a mesas de café, cada mesa cubierta de trozos de papel que los físicos garabatean continuamente.

Intenté unirme a Gary Horowitz, Jeff Harvey y otros dos amigos en su mesa, pero, antes de que pudiera hacerlo, algo captó mi atención. Estaba teniendo lugar una conversación de un tipo diferente y sucumbí a la tentación de espiar. En una esquina

apartada de la habitación, el rey estaba presidiendo la corte: Stephen, sentado en el centro, ligeramente elevado en su trono mecánico, estaba dando audiencia a un grupo de periodistas británicos. Obviamente la entrevista no era sobre física sino sobre Stephen. Cuando llegué, él estaba hablando de su propia historia y de su enfermedad. Su narración debía estar pregrabada pero, como siempre, una esencia inefable de su personalidad característica se imponía a la monotonía de la voz robótica.

Los periodistas estaban hipnotizados; estudiaban el rostro de Stephen en busca de signos sutiles mientras él hablaba de su vida antes de que se le diagnosticara la enfermedad de Lou Gehrig. Según su testimonio, aquellos primeros años estuvieron dominados por una sensación de aburrimiento, el aburrimiento de un joven que parecía que no iba a ninguna parte. Tenía veinticuatro años y era un estudiante de física normal que no hacía muchos progresos: un poco vago y con poca ambición. Luego llegó el primer golpe de medianoche, el terrible diagnóstico, una sentencia de muerte. Todos vivimos bajo una sentencia de muerte, pero en el caso de Stephen parecía inmediata: un año, quizá dos, probablemente ni siquiera el tiempo suficiente para terminar su doctorado.

Inicialmente, Stephen fue presa del terror y la depresión. Según algunos informes, empezó a beber más de lo debido. Tenía pesadillas en las que era ejecutado sumariamente. Pero entonces sucedió algo inesperado. De algún modo, la idea de una muerte inminente fue reemplazada por la perspectiva de algunos años de prórroga. El resultado fue un súbito y poderoso deseo de vivir. El

aburrimiento fue reemplazado por la fuerte necesidad de dejar su huella en la física, casarse, tener hijos y experimentar el mundo y todo lo que ofrece durante el tiempo de vida que le quedara. Stephen dijo algo sorprendente e inolvidable a los periodistas, algo que yo habría descartado como una pura sandez si viniera de otro. Dijo que convertirse en un enfermo —un discapacitado— fue lo mejor que le podía haber sucedido.

Yo no soy propenso a dar culto al héroe. He admirado a algunos científicos y figuras literarias por su claridad y profundidad, pero no los considero héroes personales. Hasta ese día, el único gigante en mi panteón de héroes era el gran Nelson Mandela. Pero mientras espiaba en el Newton, llegué a ver de repente a Stephen como una figura realmente heroica: un hombre suficientemente grande para llenar los zapatos de Moby Dick (si las ballenas llevaran zapatos).

Pero también pude ver —o imaginé que podía ver— lo fácil que sería para un hombre como Stephen convertirse en un flautista de Hamelín. Recuerdo los respetuosos silencios, dignos de una catedral, que llenan las grandes salas de conferencias mientras Stephen compone una respuesta a una pregunta.

No era sólo en las comunidades académicas donde Stephen tenía ese tratamiento. En una ocasión yo estaba cenando con Stephen, su mujer Elaine, y uno de sus primeros estudiantes que llegaría a ser famoso, Raphael Bousso. Estábamos en el centro de Texas en un restaurante de carretera como los que se pueden encontrar a lo largo de cualquier autovía en Estados Unidos. Estábamos ya comiendo —Elaine, Raphael y yo conversando, Stephen básicamente

oyendo— cuando un venerable camarero reconoció a Stephen. Se acercó con el respeto, reverencia, temor y humildad de un devoto católico que inesperadamente hubiera encontrado al papa en una cena. Prácticamente se arrojó a los pies de Stephen, pidiendo una bendición, mientras revelaba la profunda afinidad personal que siempre había sentido por el gran físico.

Ciertamente Stephen disfruta siendo una supercelebridad; es una de las pocas salidas que tiene para comunicarse con el mundo. Pero ¿disfruta o alienta la veneración casi religiosa? No es fácil decir lo que él está pensando, pero he pasado mucho tiempo con él y puedo leer sus expresiones faciales, al menos hasta cierto punto. La sutil señal que emergió en el restaurante de Texas sugería irritación, no placer.

Pero volvamos a mi propósito original al venir a Inglaterra: convencer a Stephen de que su creencia en la pérdida de la información era errónea. Por desgracia, las discusiones directas con Stephen son casi imposibles para mí. No tengo paciencia para esperar durante varios minutos una respuesta de sólo unas palabras. Pero había otros —tales como Don Page, Gary Horowitz y Andy Strominger— que habían pasado mucho tiempo interactuando y colaborando con él. Ellos habían aprendido a comunicarse con él de una forma mucho más eficiente que yo.

Mi estrategia dependía de dos cosas. La primera era que a los físicos les gusta hablar, y yo soy muy bueno en provocar conversaciones. De hecho, soy tan bueno en eso que, incluso si pueden estar en desacuerdo conmigo, los físicos tienden a sumarse a las discusiones

que inicio. Cada vez que visito un departamento de física, florecen los miniseminarios, incluso en los lugares más tranquilos. Por eso yo sabía que sería fácil reunir a algunos amigos comunes de Stephen y míos (eran amigos, incluso si los veía como el enemigo en la guerra de los agujeros negros) e iniciar una discusión. Estaba seguro de que Stephen se vería arrastrado —mantenerle apartado de una discusión de física es como mantener a un gato alejado de una planta de menta— y pronto él y yo iríamos a ello, con todo nuestro arsenal, hasta que un bando u otro admitiera la derrota.

Mi estrategia dependía también de la fuerza de mis argumentos y la debilidad de los del otro bando. Yo no tenía ninguna duda de que finalmente ganaría.

Todo funcionó de forma espléndida... excepto por un detalle: Stephen nunca se unió. Resultó ser un período en el que él se encontraba especialmente mal y le veíamos muy poco. Como resultado, las batallas eran exactamente las mismas que yo había mantenido en Estados Unidos durante varios años. La ballena estaba escapándose sin que pudiera dispararle.

Un día o dos antes de dejar Cambridge, yo tenía programado dar un seminario formal para todo el instituto sobre complementariedad de agujero negro. Ésta era la última oportunidad para una confrontación con Stephen. La sala estaba llena hasta los topes. Stephen llegó justo cuando yo estaba empezando y se sentó en el fondo. Normalmente él se sienta cerca de la pizarra, pero esta vez no estaba sólo; su enfermera y otro ayudante le acompañaban, por si necesitara atención médica. Era obvio que tenía problemas, y

aproximadamente a mitad de seminario se fue. Así fue. Ahab había perdido su oportunidad.

El seminario terminó hacia las 5:00 p. m., y para entonces yo había tenido bastante del Instituto Newton. Quería salir de Cambridge. Anne estaba visitando a una amiga y me había dejado el coche de alquiler. En lugar de volver conduciendo a nuestro apartamento, me dirigí a la villa vecina, Milton, y me detuve en un *pub*. Yo no soy bebedor, y beber solo no es desde luego mi costumbre, pero en este caso realmente quería sentarme y tomarme una cerveza. No era soledad lo que quería; era simplemente la ausencia de físicos.

Era un típico *pub* rural, con un barman de edad mediana y algunos clientes locales en la barra. Uno de los clientes era un hombre que yo diría octogenario, con un traje marrón y una corbata de pajarita, y que se apoyaba en un bastón. No creo que fuera irlandés, pero tenía un fuerte parecido con el actor Barry Fitzgerald, que era el antagonista de Bing Crosby en *Siguiendo mi camino*. (Fitzgerald representaba a un sacerdote irlandés malhumorado pero de buen corazón). El cliente estaba enzarzado en una discusión educada con el barman, que le llamaba Lou.

Estando completamente seguro de que no era un físico, me senté en la barra cerca de Lou y pedí mi cerveza. No recuerdo exactamente cómo empezó la conversación, pero me dijo que había tenido una corta carrera militar que había terminado con la pérdida de una pierna durante la guerra, que yo supuse que era la segunda guerra mundial. La falta de una pierna no parecía dificultar su capacidad para estar en la barra.

La conversación derivó inmediatamente hacia quién era yo y qué estaba haciendo en Milton. Yo no estaba de humor para hablar de física, pero no quería mentir al anciano caballero. Le dije que estaba en Cambridge por una conferencia sobre agujeros negros. Entonces él me dijo que era un experto en el tema y podía decirme muchas cosas que quizá yo no supiera. La conversación empezó a derivar en una dirección extraña. Él afirmaba que según la leyenda de la familia, uno de sus ancestros había estado en el agujero negro pero había salido en el último momento.

¿De qué agujero negro estaba hablando? Chiflados con teorías sobre agujeros negros los hay a montones y son normalmente muy aburridos, pero este hombre no se parecía al charlatán habitual. Tras beber un trago, pasó a decir que el Agujero Negro de Calcuta era un lugar condenadamente feo, más desagradable que cualquier otro.

¡El Agujero Negro de Calcuta! Era evidente que él pensaba que yo estaba en Cambridge por una reunión de historiadores sobre la historia anglo-india. Yo había oído hablar del Agujero Negro de Calcuta, pero no tenía ni idea de lo que era. Mi vaga impresión era que se trataba de un prostíbulo donde se robaba y asesinaba a soldados británicos incautos.

Decidí no aclarar la situación y, en su lugar, aprender lo más posible sobre el agujero negro original. La historia es controvertida pero parece que se trataba de una bodega, o simplemente un calabozo, en un fuerte británico que fue destruido por fuerzas enemigas en 1756. Un gran número de soldados británicos

quedaron atrapados en la bodega por la noche y, probablemente por accidente, se libraron de la muerte. Según la leyenda de la familia, siete generaciones atrás, uno de los ancestros de Lou había escapado por los pelos de estar entre los muertos.

Así que había encontrado un caso de información que escapa de un agujero negro. ¡Ojalá Stephen hubiera estado allí para oírlo!

Capítulo 18

El mundo como un holograma

Subvertir el paradigma dominante.

(Visto en una pegatina de un parachoques).

Cuando dejé Cambridge, era consciente de que el problema no estaba en Stephen o los relativistas. Horas de discusión, especialmente con Gary Horowitz (la H de CGHS), un reconocido relativista, me habían convencido de lo contrario. Además de ser un mago con las ecuaciones de la relatividad general, Gary es un pensador profundo al que le gusta ir al fondo de las cosas. Él había dedicado muchas horas de reflexión a la paradoja de Stephen y, aunque tenía una clara comprensión de los peligros de la pérdida de información, había concluido que Stephen tenía razón; no podía ver la forma de evitar la conclusión de que la información debe perderse cuando se evaporan los agujeros negros. Cuando expliqué a Gary la complementariedad de agujero negro (y no por primera vez), él lo entendió muy bien pero pensaba que era un paso demasiado radical. Postular incertidumbres mecano-cuánticas que operan en una escala tan grande como un enorme agujero negro parecía exagerado. Estaba claro que no era una cuestión de pereza intelectual. Todo se reducía a una pregunta: ¿en qué principios crees?

En mi vuelo de vuelta de Cambridge me di cuenta de que el problema real era la ausencia de una base matemática firme para la

complementariedad de agujero negro. Incluso Einstein había sido incapaz de convencer a la mayoría de los demás físicos de que su teoría corpuscular de la luz era correcta. Se necesitaron unos veinte años, un experimento crítico y las teorías matemáticas abstractas de Heisenberg y Dirac antes de que el caso fuera cerrado. Obviamente, suponía yo, nunca habría un experimento para poner a prueba la complementariedad de agujero negro. (En eso yo estaba equivocado). Pero quizá fuera posible una base teórica más rigurosa. Al salir de Inglaterra no me podía imaginar que en menos de cinco años la física matemática llegaría a abrazar una de las ideas más filosóficamente perturbadoras de todos los tiempos: la idea de que, en cierto sentido, el sólido mundo tridimensional de la experiencia es una mera ilusión. Y no podía imaginar cómo esta ruptura radical iba a cambiar el curso de la guerra de los agujeros negros.

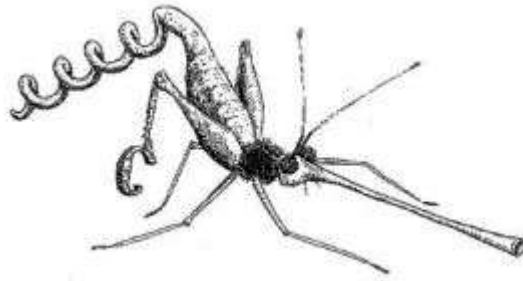
Holanda

Adiós vieja Inglaterra. Hola, molinos de viento y altos holandeses. Antes de volver a casa iba a cruzar el mar del Norte para visitar a mi amigo Gerard 't Hooft. Tras un breve vuelo a Ámsterdam, Anne y yo fuimos en automóvil a Utrecht, otra ciudad de canales y casas estrechas, donde Gerard es catedrático de física —*e/* catedrático de física, dirían algunos. En 1994 todavía no se le había concedido el premio Nobel, pero nadie dudaba que pronto lo tendría.

Entre los físicos, el nombre 't Hooft es sinónimo de grandeza científica, y en Holanda —un país que, sospecho, ha tenido más grandes físicos per cápita que cualquier otro— es un tesoro

nacional. Por eso, cuando llegué a la Universidad de Utrecht me quedé sorprendido por el modesto despacho que ocupaba Gerard. Ese verano Europa era un invernadero húmedo, y Holanda, pese a su fama de lugar frío y húmedo, era insoportable. El reducido despacho de 't Hooft era como todos los demás: ni siquiera tenía un aparato de aire acondicionado. Según recuerdo, estaba en el lado del edificio en el que daba el sol, y yo me preguntaba qué milagro protegía a su planta grande, verde y exótica, de morir de calor. Como huésped, me colocaron a la vuelta de la esquina en un despacho a la sombra, pero seguía haciendo demasiado calor para trabajar o incluso para discutir sobre nuestra pasión común: los agujeros negros.

Los fines de semana, Gerard, Anne y yo montábamos en el coche de Gerard y recorríamos los pueblos más pequeños cercanos a Utrecht, donde el aire era un poco más fresco. Como muchos grandes científicos, 't Hooft tiene una tremenda curiosidad por el mundo natural —no sólo la física sino toda la Naturaleza. La curiosidad por la posible evolución de los animales en un mundo dominado por la polución urbana le había llevado a diseñar toda una suerte de criaturas futuristas. Ésta es una de sus creaciones. Puede usted encontrar más en su página web.



«Het Wijndiefje» (ladrón de vino), Bacchus deliriosus. Este parásito puede encontrarse cerca de pubs. Completamente equipado para abrir botellas y todo tipo de latas, puede ser muy molesto si su bodega está infectada por él.

T Hooft es también pintor y músico aficionado. También Anne pinta y toca el piano, de modo que en el coche y en las comidas en los pueblos —con pasteles holandeses, agua mineral fría y montones de helados— hablábamos de todo, desde la forma de las conchas marinas y la evolución futura de la vida en un planeta sin problemas hasta de los pintores holandeses y la técnica pianística. Pero no de agujeros negros.

Durante la semana discutíamos un poco de física. Gerard es un interlocutor al que le gusta llevar la contraria, y nuestras conversaciones solían terminar así: «Gerard», decía yo, «estoy totalmente de acuerdo contigo». «Sí», respondía, «pero yo discrepo totalmente de ti».

Había un punto particular del que yo quería hablar. Era algo que había estado pensando durante casi veinticinco años, y tenía que ver con la teoría de cuerdas. Pero a Gerard no le gustaba la teoría de cuerdas, y llevarle a ello era una cruz. Lo que yo quería señalar

concernía a la localización de bits de información individuales. Hay algo extraño en la teoría de cuerdas con lo que yo tropecé por primera vez en 1969, pero es tan descabellado que ni siquiera los teóricos de cuerdas quieren considerarlo.

La teoría de cuerdas dice que todas las cosas del mundo están hechas de cuerdas elásticas, unidimensionales y microscópicas. Las partículas elementales, tales como fotones y electrones, son lazos de cuerda extraordinariamente pequeños, cada uno de ellos no mucho mayor que la escala de Planck. (No se preocupe si no le doy los detalles. En el próximo capítulo le diré las ideas principales. Por ahora, acepte simplemente la premisa).

El principio de incertidumbre hace que estas cuerdas vibren y fluctúen con movimiento de punto cero (véase capítulo 4), incluso cuando no tienen energía extra. Partes diferentes de la misma cuerda están en constante movimiento con respecto a las demás, lo que estira la cuerda y dispersa a cierta distancia las diferentes partes. En sí misma, esta dispersión no es un problema; los electrones en un átomo están distribuidos sobre un volumen mucho mayor que el del núcleo, y esto también se debe al movimiento de punto cero. Todos los físicos dan por hecho que las partículas elementales no son puntos espaciales infinitamente pequeños. Todos esperamos que electrones, fotones y otras partículas elementales sean al menos tan grandes como la longitud de Planck, y posiblemente más grandes. El problema es que las matemáticas de la teoría de cuerdas implican un caso absurdamente violento de agitaciones cuánticas, con fluctuaciones tan enormes que las partes

de un electrón se dispersarían hasta los propios confines del universo. Para la mayoría de los físicos, incluidos los teóricos de cuerdas, eso parece tan loco que es impensable.

¿Cómo es posible que un electrón sea tan grande como el universo y no lo advirtamos? Usted podría preguntarse qué impide que las cuerdas en su cuerpo golpeen o se entrelacen con las cuerdas de mi cuerpo, incluso si estamos a cientos de kilómetros uno de otro. La respuesta no es sencilla. En primer lugar, las fluctuaciones son extraordinariamente rápidas, incluso en la infinitesimal escala de tiempo que fija el tiempo de Planck. Pero también están ajustadas con mucha delicadeza, de modo que las fluctuaciones de una cuerda están sutilmente acopladas a las de una segunda cuerda de la manera precisa para hacer que se cancelen los malos efectos. Sin embargo, si usted pudiera observar los movimientos internos más rápidos de punto cero de una partícula elemental, descubriría que sus partes fluctúan hasta los confines del universo. Al menos eso es lo que dice la teoría de cuerdas.

Este comportamiento incontroladamente extraño me recordaba lo que le decía en broma a Lárus Thorlacius (véase página 249): el mundo dentro de un agujero negro podría ser como un holograma, y la información real estaría muy lejos del horizonte bidimensional. La teoría de cuerdas, si se toma en serio, va incluso más allá. Coloca cada bit de información, ya sea en un agujero negro o en papel de periódico negro, en los bordes externos del universo, o en el «infinito» si el universo no tiene fin.

Cada vez que empezaba a discutir esta idea con 't Hooft nos quedábamos atascados en el principio. Pero muy poco antes de que yo dejara Utrecht para volver a casa, Gerard dijo algo que me dejó conmovido. Dijo que si pudiéramos mirar los detalles microscópicos en la escala de Planck en las paredes de su despacho, éstas contendrían en principio cada bit de información sobre el interior de la habitación. No recuerdo si utilizó la palabra holograma, pero claramente estaba pensando lo mismo que yo: en cierta manera que no entendemos, cada bit de información en el mundo está almacenado en las fronteras más distantes del espacio. De hecho, él se me había adelantado: mencionó un artículo de unos meses atrás en el que él había especulado sobre esta idea.

La conversación terminó con ese comentario, y no hablamos mucho sobre agujeros negros durante mis dos últimos días en Holanda. Pero cuando esa noche volví al hotel, elaboré un argumento detallado que demostraba el punto: la máxima cantidad de información que puede contenerse en una región del espacio no puede ser mayor que la que puede almacenarse en la frontera de dicha región, utilizando no más de un cuarto de bit por área de Planck.

Permítame ahora hacer un comentario sobre la ubicuidad del *un-cuarto* que aparece de forma recurrente. *¿Por qué un-cuarto de bit por área de Planck en lugar de un bit por área de Planck?* La respuesta es trivial. Históricamente, la unidad de Planck estaba definida de forma muy pobre. En realidad, los físicos deberían volver atrás y redefinir la unidad de Planck de modo que cuatro áreas de

Planck se conviertan en un área de Planck. Yo abriré el camino; de ahora en adelante, la regla será como sigue:

La máxima entropía en una región de espacio es un bit por área de Planck.

Volvamos a Ptolomeo, a quien encontramos en el capítulo 7. Allí imaginábamos que él tenía tanto miedo a una conspiración que sólo permitía en su biblioteca la información que fuera visible desde el exterior. Por consiguiente, tenía que estar escrita sólo en las paredes exteriores. Con un bit por área de Planck, la biblioteca de Ptolomeo podía contener un máximo de 10^{74} bits. Ésa es una enorme cantidad de información, mucho más de la que podría guardar cualquier biblioteca real, pero en cualquier caso mucho menor que los 10^{109} bits de tamaño de Planck que podrían haber estado concentrados en el interior de su biblioteca. Lo que 't Hooft había conjeturado y lo que yo demostré en la habitación, de mi hotel era que la ley imaginaria de Ptolomeo corresponde a una genuina limitación física sobre la cantidad de información que puede mantener una región del espacio.

Píxeles y vóxeles

Una moderna cámara digital no necesita película. Tiene una «retina» bidimensional llena de unas celdas microscópicas sensibles a la luz llamadas píxeles. Todas las imágenes, ya sean modernas fotografías digitales o antiguas pinturas en cuevas, son ilusiones; nos engañan haciéndonos ver lo que no está allí, representando imágenes

tridimensionales incluso si sólo contienen información bidimensional. En *La lección de anatomía*, Rembrandt nos engaña haciéndonos ver sustancia, capas y profundidad, cuando realmente sólo hay una fina capa de pintura en un lienzo bidimensional.



¿Por qué funciona el truco? Todo sucede en el cerebro, donde circuitos especializados crean una ilusión basada en la experiencia previa: usted ve lo que su cerebro ha sido instruido para ver. En realidad, no hay suficiente información en el lienzo para decirle si los pies del hombre muerto están realmente más cerca de usted o son demasiado grandes para el resto del cuerpo. ¿Está el cuerpo visto en escorzo o es que simplemente es muy corto? Los órganos, la sangre y las vísceras bajo su piel están en su cabeza. Para usted, el hombre no es un hombre en absoluto, sino un modelo de escayola —o incluso una pintura bidimensional. ¿Quiere usted ver lo que

está escrito en el rollo que hay detrás de la cabeza del hombre más alto? Trate de caminar alrededor del cuadro para tener un punto de vista mejor. Lo siento, la información simplemente no está allí. La imagen de la pantalla de su cámara llena de píxeles tampoco almacena información tridimensional real; también es una ilusión.

¿Es posible construir un sistema electrónico para almacenar genuina información tridimensional? Por supuesto que lo es. En lugar de llenar una superficie con píxeles bidimensionales, imaginemos que llenamos un volumen de espacio con celdas tridimensionales microscópicas o, como a veces se les llama, *vóxeles*. Puesto que la matriz de vóxeles es realmente tridimensional, es fácil imaginar cómo la información codificada puede representar fielmente un fragmento sólido del mundo tridimensional. Es tentador conjeturar un principio: la información bidimensional puede almacenarse en una matriz bidimensional de píxeles, pero la información tridimensional sólo puede almacenarse en una matriz tridimensional de vóxeles. Podríamos darle un nombre imaginativo, algo así como la *invariancia de dimensionalidad*.

La corrección aparente de este principio es lo que hace tan sorprendentes los hologramas. Un holograma es una lámina bidimensional o una matriz bidimensional de píxeles que puede almacenar todos los detalles de una escena tridimensional. No es una falsificación creada en su cerebro. La información está realmente en la película.

El principio del holograma ordinario fue descubierto por primera vez en 1947 por el físico húngaro Dennis Gabor. Los hologramas son fotografías inusuales que consisten en figuras de interferencia, una trama de bandas de tipo cebra similares a las que forma la luz cuando pasa por dos rendijas. En un holograma, la figura no está formada por luz procedente de dos rendijas, sino por luz dispersada de diferentes partes del objeto que se quiere mostrar. La película fotográfica está llena de información en forma de manchas microscópicas brillantes y oscuras. No se parece en nada al objeto tridimensional real; bajo un microscopio, todo lo que se puede ver es ruido óptico aleatorio⁷¹, algo como esto:

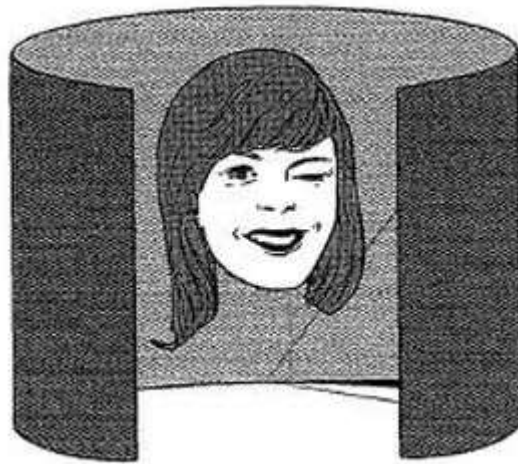


Los objetos tridimensionales han sido descompuestos y reunidos de nuevo en lo que parece ser una forma bidimensional completamente revuelta. Sólo mediante ese barajado, un fragmento del mundo

⁷¹ El término *ruido* en este contexto no se refiere al sonido. Indica información aleatoria y desestructurada, tal como el ruido blanco en la pantalla de un televisor averiado.

tridimensional puede ser fielmente representado en una superficie bidimensional.

El barajado puede deshacerse, pero sólo si se conoce el truco. La información está en la película, y puede ser reconstruida. La luz que ilumina la pauta revuelta será dispersada, y se reconstituirá como una imagen tridimensional realista y que flota libremente.



La realidad fantasmal de una imagen holográfica puede verse desde cualquier ángulo y parece sólida. Con la tecnología correcta, Ptolomeo podría haber cubierto las paredes de su biblioteca con píxeles que contuvieran una imagen holográfica revuelta de miles de rollos. En las condiciones de iluminación correctas, estos rollos habrían aparecido como imágenes tridimensionales en el interior de su biblioteca.

Probablemente verá usted que le estoy llevando a un territorio muy extraño, pero todo es parte del proceso de recableado intelectual que la física está sufriendo una vez más. Ésta es la conclusión a la que

habíamos llegado 't Hooft y yo: el mundo tridimensional de la experiencia ordinaria —el universo lleno de galaxias, estrellas, planetas, casas, rocas y personas— es un holograma, una imagen de la realidad codificada en una superficie bidimensional lejana. Esta nueva ley de la física, conocida como el principio holográfico, afirma que todo lo que hay en el interior de una región del espacio puede describirse por bits de información restringidos a la frontera. Para decirlo en términos concretos, consideremos la habitación en la que estoy trabajando. Yo en mi sillón, el ordenador delante de mí, mi mesa desordenada con pilas de artículos que temo tirar... toda esa información está codificada en bits planckianos, demasiado pequeños para verlos pero que cubren densamente las paredes de la habitación. O en su lugar, pensemos en todo lo que hay a menos de un millón de años luz del sol. Esta región también tiene una frontera —no paredes físicas, sino una imaginaria cáscara matemática— que contiene todo lo que hay dentro de ella: gas interestelar, estrellas, planetas, personas y todo lo demás. Como antes, todo lo que hay dentro de esta cáscara gigante es una imagen de bits microscópicos dispersados sobre la cáscara. Además, el número de bits requeridos es como máximo uno por área de Planck. Es como si la frontera —ya sea las paredes del despacho o la cáscara matemática— estuviera hecha de minúsculos píxeles, cada uno de ellos ocupando un área de Planck, y todo lo que tiene lugar en el interior de la región es una imagen holográfica de la frontera pixelada. Pero como sucede con un holograma ordinario, la

información codificada en la frontera lejana es una representación muy revuelta del original tridimensional.

El principio holográfico es un alejamiento chocante de aquello a lo que hemos estado acostumbrados en el pasado. Que la información está distribuida a lo largo del volumen de espacio parece tan intuitivo que es difícil creer que pudiera ser falso. Pero el mundo no está voxelado, está pixelado, y toda la información está almacenada en la frontera del espacio. Pero ¿qué frontera y qué espacio?

En el capítulo 7 planteé esta pregunta: ¿dónde está la información de que Grant está enterrado en la Tumba de Grant? Después de rechazar algunas respuestas falsas, concluí que la información está en la Tumba de Grant. Pero ¿es eso realmente cierto? Empecemos con la región de espacio encerrada en el ataúd de Grant. Según el principio holográfico, los restos de Grant son una ilusión holográfica —una imagen reconstruida de la información almacenada en las paredes del ataúd. Además, los restos, y el propio ataúd, están contenidos dentro de las paredes del gran monumento llamado la Tumba de Grant.



De modo que los restos de Grant, los restos de su esposa Julia, los ataúdes y los turistas que van a verlos, son todas imágenes de información almacenada en las paredes de la tumba.

Pero ¿por qué detenemos aquí? Imaginemos una enorme esfera que encierra todo el Sistema Solar. Grant, Julia, ataúdes, turistas, tumba, la Tierra, el Sol y los nueve planetas (¡Plutón es un planeta!) están todos codificados por información almacenada en la gran esfera. Y así continúa, hasta que llegamos a la frontera del universo o al infinito.

Es evidente que la pregunta acerca de dónde está localizado un bit de información concreto no tiene una única respuesta. La mecánica cuántica ordinaria introduce un grado de incertidumbre en tales

preguntas. Hasta que uno mira una partícula, o cualquier otro objeto para el caso, hay una incertidumbre cuántica en su localización. Pero una vez que el objeto es observado, todo el mundo estará de acuerdo en dónde está. Si resulta que el objeto es un átomo del cuerpo de Grant, la mecánica cuántica ordinaria hará su localización ligeramente incierta, pero no la llevará a los confines del espacio, ni siquiera a las paredes de su ataúd. Entonces, si preguntar dónde está localizado un bit de información no es la pregunta correcta, ¿cuál es?

Cuando tratamos de ser más y más exactos, especialmente cuando tenemos en cuenta la gravedad y la mecánica cuántica, nos vemos llevados a una representación matemática que incluye pautas de píxeles que danzan a lo largo de una lejana pantalla bidimensional y un código secreto para traducir las pautas revueltas en imágenes tridimensionales coherentes. Pero, por supuesto, no hay una pantalla cubierta de píxeles que rodea cada región del espacio. El ataúd de Grant es parte de la Tumba de Grant, que es parte del Sistema Solar, que está contenido en una esfera de tamaño galáctico que rodea a la Vía Láctea... hasta que el universo entero está rodeado. En cada nivel, todo lo que está encerrado puede describirse como una imagen holográfica, pero cuando vamos a buscar el holograma, siempre está en el siguiente nivel⁷².

⁷² El principio holográfico plantea preguntas extrañas, preguntas que se podrían haber leído en *Amazing Stories* u otras revistas de ciencia ficción en los años cincuenta del siglo pasado. «¿Es nuestro mundo una ilusión tridimensional de un mundo de píxeles bidimensional, quizá programado en una computadora cósmico cuántica?». Más excitante todavía, «¿Serán capaces los futuros aficionados de simular realidad en una pantalla de píxeles cuánticos y hacerse señores de su propio universo?». La respuesta a ambas preguntas es sí, pero... Ciertamente, el

Por extraño que sea el principio holográfico —y es muy extraño— se ha convertido en parte de la corriente principal de la física teórica. Ya no es sólo una especulación sobre la gravedad cuántica; se ha convertido en una



herramienta de trabajo cotidiano que responde no sólo a preguntas sobre gravedad cuántica sino también a cosas prosaicas, como los núcleos de los átomos (véase capítulo 23).

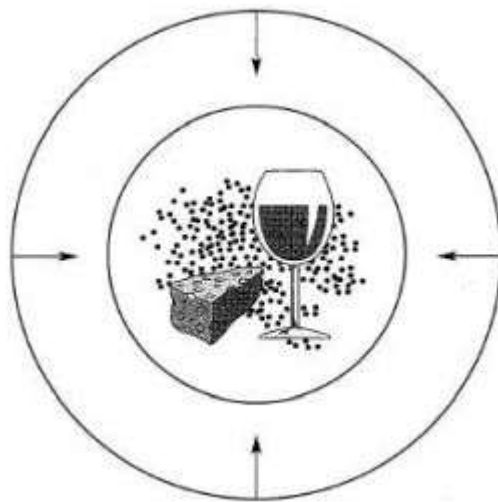
Aunque el principio holográfico es una violenta reestructuración de las leyes de la física, la demostración no requiere matemáticas fantásticas. Empezamos con una región esférica de espacio delimitada por una frontera matemática imaginaria. La región contiene algún «material», algo —gas hidrógeno, fotones, queso, vino, cualquier cosa— siempre que no sobrepase la frontera. Yo lo llamaré simplemente el material.

La cosa más masiva que puede comprimirse dentro de la región es un agujero negro cuyo horizonte coincida con la frontera. El material no debe tener más masa que ésa, o de lo contrario sobrepasaría la frontera, pero ¿hay un límite del número de bits de información en el material? En eso es en lo que estamos

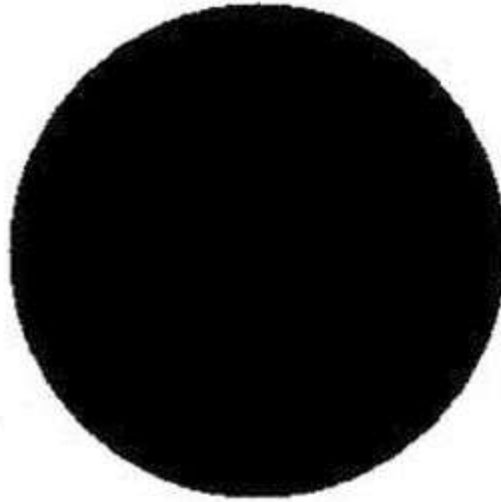
mundo entero podría estar en una computadora cuántico futurista, pero no veo que el principio holográfico añada mucho a la idea, excepto que el número de elementos del circuito podría ser algo menor de lo esperado. Se necesitarían 10^{180} de ellos para llenar el universo. Los constructores futuros del mundo podrían sentirse aliviados porque, gracias al principio holográfico, sólo necesitarán 10^{120} píxeles. (En comparación, una cámara digital tiene unos pocos millones).

interesados: en determinar el máximo número de bits que pueden acumularse dentro de la esfera.

Imaginemos a continuación una cáscara esférica de materia —no una cáscara imaginaria, sino una hecha de materia real— que rodea todo el montaje. La cáscara, hecha de material real, tiene su propia masa. Cualquiera que sea la materia de la que esté hecha, puede ser comprimida, bien por presión externa o bien por la atracción gravitatoria del material en el interior, hasta que encaje perfectamente en la región.

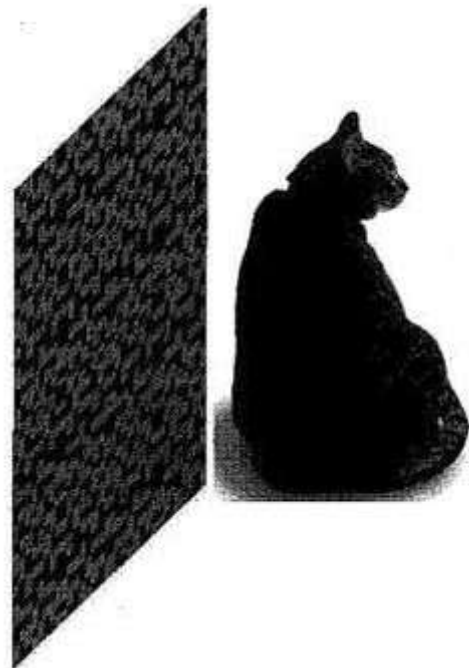


Ajustando la masa de la cáscara, podemos crear un horizonte que coincide con la frontera de la región.



El material original del que partimos tenía cierta cantidad de entropía —información oculta— cuyo valor dejamos sin especificar. Pero no hay duda sobre la entropía *final*: es la entropía del agujero negro, su área en unidades de Planck.

Para completar su argumento, sólo tenemos que recordar que la segunda ley de la termodinámica exige que la entropía aumente siempre. Por eso, la entropía del agujero negro debe ser mayor que la entropía del material original. Juntando todo, hemos demostrado un hecho sorprendente: el máximo número de bits de información que puede encajar en una región de espacio es igual al número de píxeles planckianos que pueden empaquetarse en el área de la frontera. Esto significa, implícitamente, que hay una «descripción de frontera» de todo lo que puede tener lugar dentro de la región del espacio; la superficie frontera es un



holograma bidimensional del interior tridimensional. Para mí, éste es el mejor tipo de argumento: un par de principios básicos, un experimento mental y una conclusión de gran alcance.

Hay otra manera de imaginar el principio holográfico. Si la esfera frontera es muy grande, cualquier pequeña porción de la misma se parecerá aproximadamente a un plano. En el pasado, las personas estaban engañadas por el gran tamaño de la Tierra y pensaban que era plana. Para un caso aún más extremo, supongamos que la frontera resulta ser una esfera de un diámetro de mil millones de años luz. Desde la perspectiva de un punto en el interior de la esfera pero sólo a algunos años luz de la frontera, la superficie esférica parecería plana. Esto significa que todo lo que tiene lugar a menos de algunos años luz de la frontera puede considerarse un holograma en una lámina plana de píxeles.

Por supuesto, usted no debería sacar la idea de que me estoy refiriendo a un holograma ordinario. No hace falta decir que una película fotográfica ordinaria tiene un grano muchísimo más grueso que una lámina de píxeles de tamaño de Planck. Además, este nuevo tipo de holograma puede cambiar con el paso del tiempo; es un holograma cinemático.

Pero la mayor diferencia es que el holograma es mecano-cuántico. Brilla y se oscurece con la incertidumbre de un sistema cuántico, para que la imagen tridimensional tenga las agitaciones cuánticas. Todos estamos hechos de bits que se mueven con movimientos cuánticos complicados, pero cuando miramos con detalle dichos bits encontramos que están localizados en las más lejanas fronteras

del espacio. No conozco nada menos intuitivo en el mundo que esto. Adaptar nuestra mente colectiva al principio holográfico es probablemente el mayor reto al que nos hemos enfrentado los físicos desde el descubrimiento de la mecánica cuántica.

El artículo de 't Hooft, que precedió al mío en varios meses, pasó básicamente desapercibido. La razón era en parte su título «Reducción dimensional en gravedad cuántica». Resulta que el término «Reducción dimensional» es un término técnico que tiene un significado completamente diferente de lo que pretendía 't Hooft. Yo me aseguré de que mi artículo no correría la misma suerte. Lo titulé «El mundo como un holograma».

De vuelta a casa desde Holanda empecé a escribirlo. Estaba muy excitado con el principio holográfico, pero también sabía que iba a ser muy difícil convencer a los demás. ¿El mundo como un holograma? Casi podía oír la reacción escéptica: «Él era un buen físico, pero se ha vuelto completamente loco».

La complementariedad de agujero negro y el principio holográfico podrían haber sido el tipo de ideas —la existencia de átomos es otro ejemplo— sobre las que físicos y filósofos discuten durante cientos de años. Hacer y estudiar un agujero negro en el laboratorio es al menos tan difícil como era ver los átomos para los antiguos griegos. Pero de hecho se necesitaron menos de cinco años para que se alcanzase un consenso. ¿Cómo sucedió el cambio de paradigma? Las armas que dieron fin a la guerra fueron fundamentalmente las matemáticas rigurosas de la teoría de cuerdas.

Cuarta parte
Se cierra el círculo

Capítulo 19

Arma de deducción masiva

En realidad, ni siquiera estaría dispuesto a llamar a la teoría de cuerdas una «teoría» antes que un «modelo», o ni siquiera eso: sólo una intuición. Después de todo, una teoría debería venir con instrucciones sobre cómo trabajar con ella para identificar las cosas que uno quiere describir, en nuestro caso las partículas elementales; y uno debería ser capaz, al menos en principio, de formular las reglas para calcular las propiedades de dichas partículas, y cómo hacer nuevas predicciones sobre ellas. Imagine que le doy un sillón, mientras le explico que todavía faltan las patas, y que el asiento, el respaldo y los brazos quizá llegarán pronto; ¿podría seguir llamando sillón a cualquier cosa que le diera?

GERARD 'T HOOFT

Por sí sólo, el principio holográfico no era suficiente para ganar la guerra de los agujeros negros. Era demasiado impreciso y carecía de una base matemática firme. La reacción ante él era el escepticismo: ¿el universo un holograma? Suena a ciencia ficción. ¿El ficticio

físico futuro Steve pasando al «otro lado» mientras el emperador y el conde observaban cómo se inmolaba? Suena a espiritismo.

¿Qué es lo que hace que una idea marginal, algo que puede haber permanecido latente durante años, incline de repente la balanza a su favor? En física suele suceder sin advertencia previa. Un suceso espectacular y crucial atrapa repentinamente la atención de una masa crítica de físicos, y en un corto período de tiempo, lo extraño, lo fantástico, lo impensable, se convierte en lo normal.

A veces es un resultado experimental. La teoría corpuscular de la luz de Einstein caló muy lentamente y la mayoría de los físicos creían que un nuevo giro salvaría finalmente la teoría ondulatoria. Pero en 1923 Arthur Compton dispersó rayos X en átomos de carbono y demostró que las pautas de los ángulos y las energías eran inequívocamente debidas a partículas que colisionan. Habían pasado dieciocho años entre la afirmación original de Einstein y el experimento de Compton, pero entonces, en pocos meses, se evaporó la resistencia a la teoría corpuscular de la luz.

Un resultado matemático, especialmente si es inesperado, puede ser el catalizador. Los elementos básicos del modelo estándar (de la física de partículas elementales) datan de mediados de la década de los sesenta del siglo pasado, pero había argumentos —algunos de ellos debidos a los propios creadores de la teoría— que afirmaban que los fundamentos matemáticos eran inconsistentes. Luego, en 1971, un joven y desconocido estudiante llevó a cabo un cálculo sutil y extraordinariamente complicado, y anunció que los expertos estaban equivocados. En muy poco tiempo el modelo estándar se

hizo verdaderamente estándar, y el estudiante desconocido — Gerard 't Hooft— irrumpió en el universo de la física como su estrella más luminosa.

Otro ejemplo de cómo las matemáticas pueden inclinar la balanza a favor de una idea «retorcida» es el cálculo de Stephen Hawking de la temperatura de un agujero negro. La respuesta inicial a la afirmación de Bekenstein de que los agujeros negros tienen entropía fue de escepticismo e incluso de burla, y Hawking no era ajeno. Vistos en retrospectiva, los argumentos de Bekenstein eran brillantes, pero en esa época eran demasiado difusos para ser convincentes, y llevaban a una conclusión absurda: los agujeros negros se evaporan. Fue el difícil cálculo técnico de Hawking el que cambió el paradigma del agujero negro, que pasó de ser una estrella fría y muerta a un objeto que brilla con su propio calor interno.

Los sucesos críticos que acabo de describir comparten algunas características. En primer lugar, son sorprendentes. Un resultado totalmente inesperado, ya sea experimental o matemático, llama poderosamente la atención. En segundo lugar, en el caso de un resultado matemático, cuanto más técnico, preciso, antiintuitivo y difícil es, más sacude a la gente para reconocer el valor de una nueva manera de pensar. Parte de la razón es que los cálculos intrincados pueden tener errores en muchos pasos. Potenciales peligros para la supervivencia les hacen difíciles de ignorar. Tanto los cálculos de 't Hooft como los de Hawking tenían esta cualidad.

En tercer lugar, los paradigmas cambian cuando nuevas ideas abren la vía a muchos trabajos más simples que otros pueden

hacer. Los físicos andan siempre buscando nuevas ideas en las que trabajar, y se lanzarán sobre cualquier cosa que cree oportunidades para su propia investigación.

La complementariedad de agujero negro y el principio holográfico eran ciertamente sorprendentes, incluso chocantes, pero por sí mismos no tenían las otras dos cualidades, al menos no aún. En 1994, una confirmación experimental del principio holográfico parecía ser totalmente inalcanzable, y también lo parecía una demostración matemática convincente. De hecho, quizá ambas estaban más cerca de lo que se pensaba. En menos de dos años empezó a tomar forma una teoría matemática precisa, y una década más tarde quizá estemos en vísperas de una fascinante confirmación experimental⁷³. Fue la teoría de cuerdas la que hizo posibles ambas cosas.

Antes de que le exponga los detalles de la teoría de cuerdas, permítame darle una visión global. Nadie sabe con seguridad si la teoría de cuerdas es la teoría correcta de nuestro mundo, y quizá no estemos seguros durante muchos años. Pero para nuestros fines, ése no es el punto más importante. Tenemos pruebas impresionantes de que la teoría de cuerdas es una teoría matemática consistente de *algún* mundo. La teoría de cuerdas se basa en los principios de la mecánica cuántica; describe un sistema de partículas elementales similar a los de nuestro propio universo; y a diferencia de otras teorías (la teoría cuántica de campos es un ejemplo oportuno), todos los objetos materiales interaccionan a

⁷³ Véase el capítulo 23.

través de fuerzas gravitatorias. Y lo más importante, la teoría de cuerdas contiene agujeros negros.

¿Cómo utilizamos la teoría de cuerdas para demostrar algo acerca de la Naturaleza si no sabemos si esta certeza es la teoría correcta? Para algunos fines, esta certeza no importa. Tomamos la teoría de cuerdas como un modelo de un mundo y entonces calculamos, o demostramos matemáticamente, si la información se pierde o no en los agujeros negros *en dicho mundo*.

Supongamos que descubrimos que la información no se pierde en nuestro modelo matemático. Una vez que lo hemos hecho, podemos mirar más de cerca y descubrir dónde se equivocó Hawking. Podemos tratar de ver si la complementariedad de agujero negro y el principio holográfico son correctos en la teoría de cuerdas. Si lo es, eso no prueba que la teoría de cuerdas sea correcta, pero sí prueba que Hawking estaba equivocado puesto que él afirmó que había demostrado que los agujeros negros *deben* destruir información en *cualquier* mundo consistente.

Voy a reducir al mínimo esencial la explicación de la teoría de cuerdas. Si usted quiere más detalles, puede encontrarlos en varios libros, —incluyendo mi primer libro *El paisaje cósmico*—: *El universo elegante* de Brian Greene y *Warped Passages* de Lisa Randall. La teoría de cuerdas fue un descubrimiento casi accidental. Originalmente no tenía nada que ver con los agujeros negros o el remoto mundo planckiano de la gravedad cuántica. Se refería al tema más pedestre de los hadrones. La palabra *hadrón* no es un término doméstico cotidiano, pero los hadrones están entre las

partículas de la Naturaleza más habituales y más intensamente estudiadas. Incluyen a protones y neutrones —las partículas que forman el núcleo atómico— así como algunos parientes llamados mesones y las humorísticamente llamadas gluébolos. En su apogeo, los hadrones estaban en la vanguardia de la física de partículas elementales, pero hoy suelen estar relegadas a un tema algo anticuado de la física nuclear. Sin embargo, en el capítulo 23 veremos que el cierre de un círculo de ideas está haciendo de los hadrones los «chicos de vuelta» de la física.

Elemental, querido Watson

Hay una vieja historia acerca de dos señoras judías que se encuentran en una esquina de Brooklyn. Una le dice a la otra, «Ya sabrás que mi hijo es doctor. Por cierto, ¿qué fue de tu hijo, el que tenía problemas para aprender aritmética?». La otra señora contesta, «¡Ah!, mi hijo ha llegado a ser catedrático de física de partículas elementales en Harvard». La primera señora responde con comprensión, «¡Oh!, querida, lamento mucho oír que nunca se graduó en física de partículas avanzadas».

¿Qué se entiende exactamente por una partícula elemental, y qué sería lo contrario? La respuesta más sencilla es que una partícula es elemental si es tan pequeña y tan simple que no puede descomponerse en piezas más pequeñas. Lo contrario no es una partícula avanzada, sino una partícula compuesta, hecha de piezas más pequeñas y más simples.

El reduccionismo es la filosofía científica para la que comprender las cosas equivale a dividir las en componentes. Hasta ahora trabajaba muy bien. Las moléculas se explican como compuestos de átomos; a su vez, los átomos son colecciones de electrones con carga negativa que orbitan en torno a un núcleo central positivo; el núcleo se revela como un conjunto de nucleones; finalmente, cada nucleón está hecho de tres quarks. Hoy todos los físicos están de acuerdo en que moléculas, átomos, núcleos y nucleones son compuestos.

Pero hubo momentos en el pasado en que se pensaba que cada uno de estos objetos era elemental. De hecho, la palabra *átomo* viene del griego y significa «indivisible», y se ha venido utilizando durante unos 2500 años. Más recientemente, cuando Ernest Rutherford descubrió el núcleo atómico, éste parecía tan pequeño que podría haber sido un simple punto. Evidentemente, a lo que una generación llama elemental, sus descendientes pueden llamarlo compuesto.

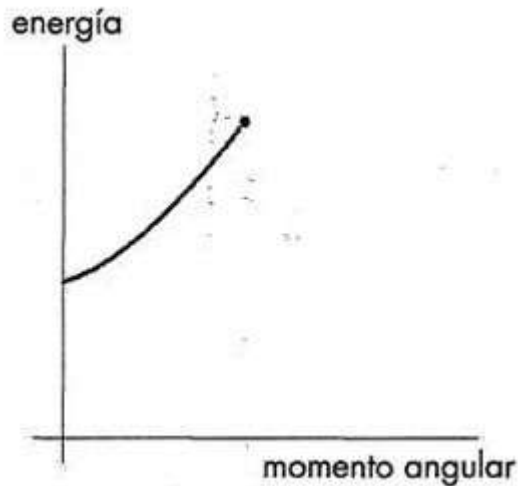
Todo esto plantea la pregunta de cómo decidimos —al menos por el momento— si una cierta partícula es elemental o compuesta. He aquí una respuesta posible: lancemos una contra otra, a mucha velocidad, y veamos si sale algo. Si sale algo, debe haber estado dentro de una de las partículas originales. De hecho, cuando colisionan dos electrones muy rápidos con mucha energía, salen escupidas todo tipo de cosas. Fotones, electrones y positrones⁷⁴ serán especialmente numerosos. Si la colisión es muy enérgica

⁷⁴ Los positrones son los gemelos en antimateria de los electrones. Tienen exactamente la misma masa que los electrones pero la carga eléctrica opuesta. Los electrones tienen carga negativa y los positrones tienen carga positiva.

saldrán protones y neutrones, además de sus antipartículas⁷⁵. Y para colmo, ocasionalmente puede aparecer un átomo entero. ¿Significa esto que los electrones están hechos de átomos? Obviamente no. Hacer chocar cosas con mucha energía puede ser útil para descubrir las propiedades de las partículas, pero lo que sale no es siempre una buena guía para saber de qué están hechas las partículas.

He aquí una manera mejor de decir si algo está hecho de partes. Empecemos con un objeto que obviamente es compuesto: una roca, un balón de baloncesto o una masa de *pizza*. Se pueden hacer muchas cosas con tal objeto: comprimirlo en un volumen más pequeño, darle una nueva forma o hacerlo girar en torno a un eje. Comprimir, doblar o girar un objeto requiere energía. Por ejemplo, un balón de baloncesto que gira tiene energía cinética; cuanto más rápido gira, mayor es la energía. Y puesto que la energía es masa, el balón que gira rápidamente tiene masa mayor. Una buena medida de la rotación —una combinación de la rapidez con la que gira, su tamaño y su masa— se denomina *momento angular*. A medida que la bola se mueve con más y más momento angular, gana energía. El siguiente gráfico ilustra la forma en que se incrementa la energía de un balón que gira.

⁷⁵ Todas las partículas tienen gemelos en antimateria con valor opuesto de la carga eléctrica y otras propiedades similares. Así, existen antiprotones, antineutrones, y las antipartículas de los electrones llamadas positrones. Los quarks no son una excepción. La antipartícula de un quark se llama antiquark.



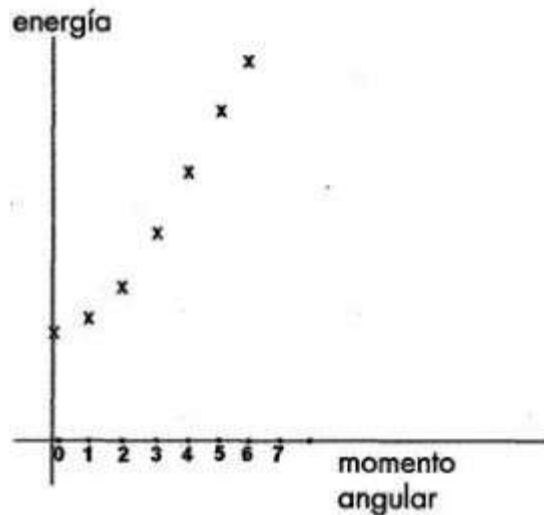
Un balón que gira

Pero ¿por qué la curva termina abruptamente? La respuesta es fácil de entender. El material del que está hecho el balón (cuero o caucho) sólo puede soportar cierta tensión. En algún momento, el balón será desgarrado por la fuerza centrífuga.

Imaginemos ahora una partícula no mayor que un punto del espacio. ¿Cómo se hace que un punto matemático gire alrededor de un eje? ¿Qué significa siquiera que gire? O para el caso, ¿qué significaría que cambiara de forma? La capacidad para poner un objeto en rotación, o para hacer que su forma oscile, es un signo seguro de que está hecho de partes más pequeñas, partes que pueden moverse unas respecto a otras.

También puede hacerse girar a moléculas, átomos y núcleos, pero en el caso de estas bolas de materia microscópicas la mecánica cuántica desempeña un papel central. Como sucede con todos los demás sistemas oscilantes, energía y momento angular sólo pueden añadirse en pasos discretos. La energía de un núcleo no aumenta de

forma gradual y continua cuando se le hace girar. El proceso es más parecido a subir una escalera. La gráfica de la energía y el momento angular es una secuencia de puntos separados⁷⁶.



Un núcleo que gira

Aparte del hecho de que los pasos son discretos, la gráfica se parece mucho a la del balón de baloncesto, incluido el hecho de que termina de forma abrupta. Como el balón de baloncesto, el núcleo sólo puede soportar cierta fuerza centrífuga antes de romperse.

¿Qué pasa con los electrones? ¿Podemos hacerlos girar? Pese a todos nuestros esfuerzos, y han sido considerables durante años, nadie ha conseguido nunca dar a un electrón un momento angular adicional. Volveremos a los electrones, pero primero dirijámonos a los hadrones: protones, neutrones, mesones y gluébolos.

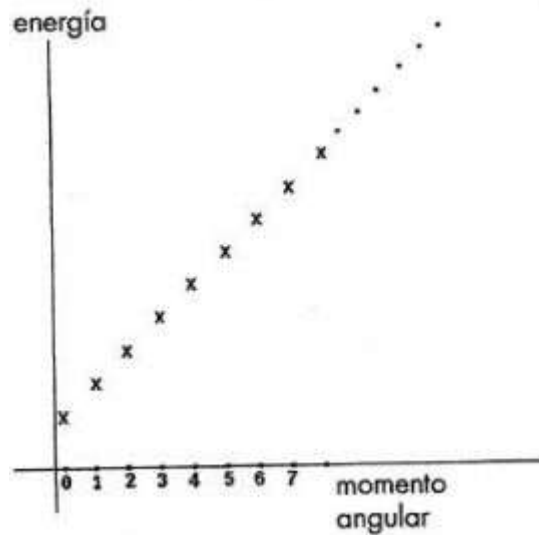
⁷⁶ El físico-matemático italiano Tullio Regge fue el primero en estudiar las propiedades de tales gráficas. La secuencia de puntos se denomina una trayectoria de Regge.

Protones y neutrones son muy parecidos. Tienen casi exactamente la misma masa, y las fuerzas que actúan para mantenerlos unidos en los núcleos son prácticamente idénticas. La única diferencia importante es que el protón tiene una pequeña carga eléctrica positiva y el neutrón, como su nombre implica, es eléctricamente neutro. Es casi como si un neutrón fuera un protón que de algún modo ha perdido su carga eléctrica. Esta similitud es la que llevó a los físicos a combinarlos, lingüísticamente, en un sólo objeto: el nucleón. El protón es el nucleón positivo y el neutrón es el nucleón neutro.

En los primeros días de la física nuclear, se creía que también el nucleón, aunque casi 2000 veces más pesado que el electrón, era una partícula elemental. Pero el nucleón no es tan simple como un electrón. A medida que avanzaba la física nuclear, objetos 100 000 veces más pequeños que los átomos ya no parecían muy pequeños. Aunque el electrón ha seguido siendo un punto espacial —al menos en cuanto a lo que podemos decir por ahora— se ha demostrado que el nucleón posee una rica y compleja maquinaria interna. El caso es que los nucleones se parece muy poco a los electrones y se parecen mucho más a núcleos, átomos y moléculas. Protones y neutrones son conglomerados de muchos objetos más pequeños. Lo sabemos porque podemos hacerlos rotar y vibrar, y podemos cambiar su forma.

Igual que lo hemos hecho para un balón de baloncesto o un núcleo atómico, podemos dibujar una gráfica que muestra la rotación de un nucleón, con el momento angular en el eje horizontal y la energía

en el eje vertical. Cuando se hizo esto por primera vez hace más de cuarenta años, la pauta que se reveló era sorprendente por su simplicidad: resultó que la secuencia de puntos estaba casi exactamente en una *línea recta*. Y lo que es aún más sorprendente, aparentemente no tenía fin.

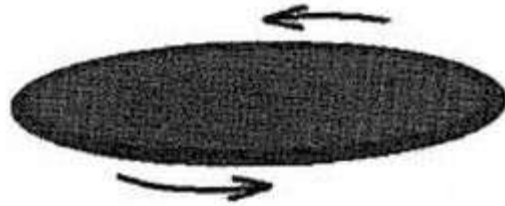


Un nucleón que gira

Diagramas de este tipo encierran claves sobre la construcción interna del nucleón. Dos rasgos notables tienen gran significado para quienes saben cómo leer el mensaje oculto. El hecho de que el nucleón puede hacerse girar alrededor de un eje indica que no es una partícula puntual; está hecho de partes que pueden moverse unas con respecto a otras. Pero hay mucho más. En lugar de terminar abruptamente, la secuencia parece seguir indefinidamente, lo que implica que el nucleón no se desgarraría cuando gira con

mucha rapidez. Sea lo que sea que mantiene unidas las partes, es mucho más tenaz que las fuerzas que mantienen unido a un núcleo.

No es sorprendente que el nucleón se estire cuando rota, pero no lo hace como una masa de *pizza*, que forma un disco bidimensional.



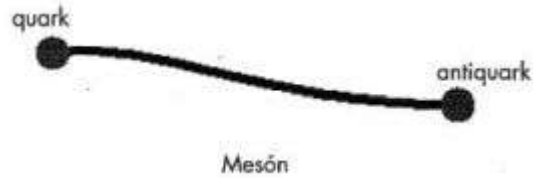
La pauta de puntos para el nucleón cae en una línea recta, lo que indica que el nucleón se estira para formar un objeto largo, delgado y elástico parecido a una cuerda.

Medio siglo de experimentación con nucleones ha asegurado que son cuerdas elásticas que pueden estirarse, girar y vibrar cuando son excitadas añadiéndoles energía. De hecho, todos los hadrones pueden girar para dar largos objetos de tipo cuerda. Evidentemente, todos están hechos de la misma materia pegajosa, correosa y estirable —algo parecido al tozudo chicle del que no podemos deshacemos. Richard Feynman utilizó el término *partones* para indicar las partes de un nucleón, pero fueron los términos de Murray Gell-Man —*quarks* y *gluones*— los que cuajaron. *Gluón* se refiere al material pegajoso que forma largas cuerdas e impide que los quarks se separen.



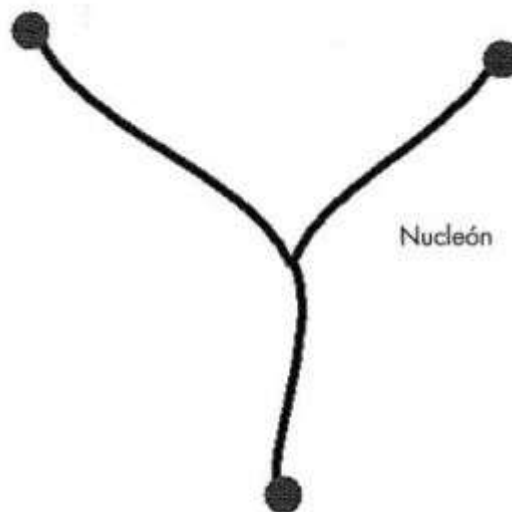
Los mesones son los hadrones más simples. Se han descubierto muchos tipos interesantes de mesones, pero todos comparten la

misma estructura: un quark y un antiquark, unidos por una cuerda pegajosa.



Un mesón puede vibrar como una cuerda, voltear alrededor de un eje como un bastón de *majorette* o doblarse de muchas maneras. Los mesones son ejemplos de *cuerdas abiertas*, lo que significa que tienen extremos. A este respecto, son diferentes de las bandas elásticas, a las que llamaríamos *cuerdas cerradas*.

Los nucleones contienen tres quarks, cada uno de ellos unido a una cuerda, y las tres cuerdas se juntan en el centro como en una boleadora. También pueden voltear y vibrar.



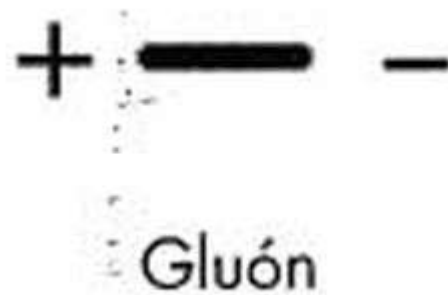
La rotación o vibración rápida de un hadrón añade energía a la cuerda, la estira e incrementa su masa⁷⁷.

Existe otro tipo de hadrón: una familia de partículas «sin quarks» hechas sólo de cuerda que se cierra sobre sí misma y forma un lazo. Los

físicos de hadrones las llaman *gluébolas*, pero para un teórico de cuerdas son sólo *cuerdas cerradas*.

Los quarks no parecen estar hechos de partículas más pequeñas. Como los electrones, son tan pequeños que su tamaño es indetectable. Pero las cuerdas que unen los quarks están definitivamente hechas de otros objetos, y dichos objetos no son quarks. Las partículas pegajosas que se combinan para formar cuerdas se llaman gluones.

En cierto sentido, los gluones son minúsculos trozos de cuerda. Aunque extremadamente pequeños, parecen en cualquier caso tener dos «extremos» —uno positivo y otro negativo— casi como si fueran minúsculos imanes⁷⁸.

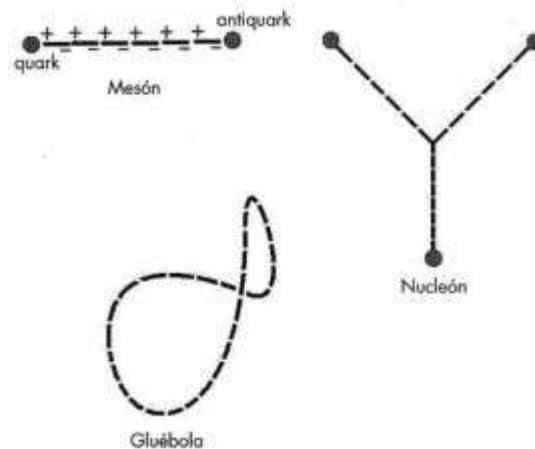


⁷⁷ Al principio, los físicos de partículas no se dieron cuenta de que muchos hadrones eran versiones rotatorias o vibrantes de nucleones y mesones; se pensaba que eran partículas completamente nuevas y distintas. Las tablas publicadas de partículas elementales desde los años sesenta incluyen largas listas que agotaban varias veces los alfabetos griego y latino enteros. Pero con el tiempo, los «estados excitados» de los hadrones se hicieron familiares y fueron reconocidos como lo que son: mesones y nucleones que rotan y vibran.

⁷⁸ Los dos extremos de un imán se denominan habitualmente polos norte y sur. No pretendo decir que los gluones se alinean como las agujas de las brújulas, de modo que llamaré a los polos del gluón positivo y negativo.

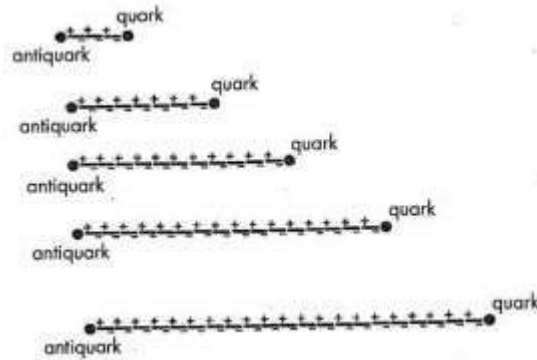
La teoría matemática de quarks y gluones se denomina cromodinámica cuántica (QCD), un nombre que suena como si tuviera más que ver con la fotografía en color que con las partículas elementales. La terminología se aclarará dentro de poco.

Según las reglas matemáticas de la QCD, un gluón no puede existir por sí solo. Por ley matemática se necesita que los extremos positivo y negativo se unan o bien a otros gluones o a quarks: todo extremo positivo debe unirse al extremo negativo de otro gluón u otro quark. Finalmente, tres extremos positivos o tres negativos pueden unirse. Con estas reglas pueden ensamblarse nucleones, mesones y gluébolos.



Consideremos ahora lo que sucede si el quark de un mesón es golpeado con gran fuerza. El quark empezará a moverse rápidamente alejándose del antiquark. Si fuera similar a un electrón dentro de un átomo, saldría disparado y escaparía, pero no es eso todo lo que sucede aquí. Cuando se separa de su compañero se forman huecos entre los gluones, igual que se forman entre las

moléculas de una goma elástica cuando se estira mucho. Sin embargo, en lugar de romperse, los gluones se clonan, produciendo más gluones para llenar los huecos. De este modo, se forma una cuerda entre el quark y el antiquark que impide que escape del quark. La siguiente figura muestra una secuencia temporal de un quark de alta velocidad que intenta escapar de su compañero antiquark en un mesón.



Finalmente, el quark agotará su energía, se detendrá y volverá de nuevo hacia el antiquark. Lo mismo sucederá con un quark de alta velocidad de un nucleón.

La teoría de cuerdas de nucleones, mesones y gluébolos no es una especulación ociosa. Ha sido muy bien confirmada con los años y ahora se considera parte de la teoría estándar de los hadrones. Lo que no está claro es si deberíamos considerar la teoría de cuerdas como una consecuencia de la cromodinámica cuántica; en otras palabras, si las cuerdas deberían considerarse como largas cadenas de los gluones más fundamentales, o si, por el contrario, los gluones

no son otra cosa que cortos segmentos de cuerda. Probablemente las dos cosas son correctas.

Los quarks parecen ser tan pequeños y elementales como los electrones. No se les puede hacer girar, comprimir o deformar. Pese al hecho de que no parecen tener partes internas, tienen un grado de complejidad que parece paradójico. Hay muchos tipos de quarks con diferentes masas y cargas eléctricas. El origen de estas diferencias es un misterio; la maquinaria interna que subyace a las diferencias es demasiado pequeña para ser detectada. Por eso las llamamos elementales, al menos por el momento, y, como los botánicos, les damos nombres diferentes.

Antes de la segunda guerra mundial, cuando la física era una actividad principalmente europea, los físicos utilizaban la lengua griega para nombrar partículas. *Fotón*, *electrón*, *mesón*, *barión*, *leptón* e incluso *hadrón* tenían su origen en el griego. Pero más tarde dominaron los norteamericanos rudos, irreverentes y a veces estúpidos, y los nombres se hicieron menos serios. La misma palabra *quark* es una palabra absurda del *Finnegan's Wake* de James Joyce, pero a partir de este punto de alta literatura las cosas fueron decayendo. Las distinciones entre los diferentes tipos de quarks se conocen por el término *sabor*, singularmente inadecuado. Podríamos haber hablado de quarks de chocolate, fresa, vainilla, pistacho, frambuesa y menta, pero no lo hacemos. Los seis sabores de quarks son arriba, abajo, extraño, encanto, fondo y cima. En cierto momento, fondo y cima se consideraron demasiado

suggerentes, así que por un breve tiempo se convirtieron en belleza y verdad.

Mi principal objetivo al hablarle del sabor es sólo ilustrar lo poco que conocemos sobre los bloques constituyentes de la materia y lo provisional que puede ser nuestra atribución del término *partícula elemental*. Pero hay otra distinción que es muy importante para la forma en que trabaja la QCD. Cada quark —arriba, abajo, extraño, encantado, cima, fondo— se da en tres *colores*: rojo, azul y verde. Ese es el origen del «cromo» en cromodinámica cuántica.

Espere un minuto. Ciertamente los quarks son demasiado pequeños para reflejar luz en el sentido habitual. Tener quarks de colores no es mucho peor que tener quarks de chocolate, fresa y vainilla. Pero la gente necesita nombres para las cosas; llamar a los quarks rojo, verde y azul no es más ridículo que llamar azules a los liberales y rojos a los conservadores. Y aunque quizá no entendemos el origen del color del quark mucho mejor que el origen del sabor del quark, el color desempeña un papel mucho más importante en QCD.

Según la QCD los gluones no tienen sabor, pero individualmente son incluso más coloridos que los quarks. Cada gluón tiene un polo positivo y uno negativo, y cada polo tiene un color: rojo, verde o azul. Es una ligera supersimplificación, aunque esencialmente correcta, decir que hay nueve tipos de gluones⁷⁹.

⁷⁹ Los expertos que lean esto advertirán que sólo hay ocho tipos distintos de gluones. Una combinación mecano-cuántica —el gluón con igual probabilidad de ser rojo-rojo, azul-azul y verde-verde— es redundante.



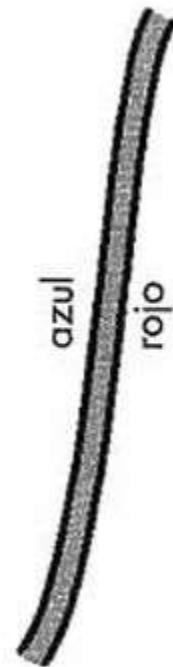
¿Por qué hay tres colores y no dos o cuatro o algún otro número? No tiene nada que ver con el hecho de que la visión de los colores se basa en tres colores primarios. Como ya he mencionado, las etiquetas de color son arbitrarias y no tienen nada que ver con los colores que vemos usted y yo. De hecho, nadie sabe con seguridad por qué hay tres; es uno de esos misterios que nos dicen que aún estamos lejos de un conocimiento completo de las partículas elementales. Pero por la forma en que se combinan en nucleones y mesones, sabemos que hay tres y sólo tres colores de quarks.

Tengo algo que confesar. Pese a que he sido un físico de partículas elementales durante más de cuarenta años, realmente no me gustan mucho las partículas. Todo es demasiado confuso: seis sabores, tres colores, docenas de constantes numéricas arbitrarias... eso difícilmente es señal de simplicidad y elegancia. ¿Por qué seguir haciéndolo entonces? La razón (y estoy seguro de que no es sólo mía) es que esa misma confusión debe estar diciéndonos algo sobre la Naturaleza. Resulta difícil creer que partículas puntuales infinitesimales pudieran tener tantas propiedades y tanta estructura. En algún nivel aún no descubierto debe haber mucha maquinaria subyacente a estas denominadas partículas elementales. Es la curiosidad por esa maquinaria oculta,

así como sus implicaciones para los principios básicos de la Naturaleza, lo que me empuja a cruzar el miserable terreno pantanoso de la física de partículas.

En cuanto a las partículas, los quarks son bien conocidos para el gran público. Pero si tuviera que conjeturar qué partículas dan las mejores pistas sobre la maquinaria oculta, apostaría por los gluones. ¿Qué está tratando de decirnos el par pegajoso de extremos positivo y negativo?

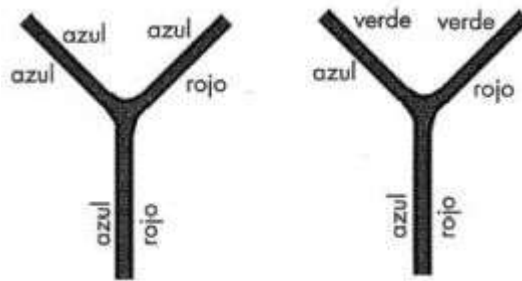
En el capítulo 4 expliqué que la teoría cuántica de campos es más que una lista de partículas. Los otros dos ingredientes son los propagadores — líneas de universo que muestran el movimiento de una partícula desde un punto del espacio-tiempo a otro— y los vértices. Veamos primero los propagadores. Puesto que los gluones tienen dos polos, cada uno de ellos etiquetado con un color, los físicos suelen dibujar líneas de universo como líneas dobles. Para indicar un tipo particular de gluones, podríamos escribir los colores próximos a las líneas individuales⁸⁰.



El último ingrediente de la teoría cuántica de campos es la lista de vértices. El más importante para nosotros es el vértice que describe

⁸⁰ Para algunos de mis colegas, el denominado propagador de línea doble es sólo un truco para seguir la pista de las posibilidades matemáticas. Para otros, entre los que me incluyo, es un indicio profundo de una estructura microscópica que actualmente es demasiado pequeña para ser detectada.

un sólo gluón que se divide en dos⁸¹. La pauta es bastante simple: cuando un gluón con dos extremos se divide, deben materializarse dos nuevos extremos. Según las reglas matemáticas de la QCD, los nuevos extremos deben tener ambos el mismo color. A continuación doy dos ejemplos. Leyendo de abajo a arriba, el primero muestra un gluón azul-rojo que se divide en azul-azul y azul-rojo; el segundo muestra un gluón azul-rojo que se divide en azul-verde y verde-rojo.



Los vértices podrían ponerse boca abajo para mostrar cómo dos gluones se fusionan en un único gluón.

Aunque no es obvio, y se necesitó algún tiempo para entenderlo plenamente, los gluones tienen una fuerte propensión a adherirse y formar largas cadenas: extremo positivo con extremo negativo, rojo con rojo, azul con azul y verde con verde. Estas cadenas son las cuerdas que unen a los quarks y dan a los hadrones sus propiedades de cuerda.

Cuerdas en los cimientos

⁸¹ Usted podrá preguntarse cómo sabemos que los gluones pueden dividirse en pares de gluones. La respuesta está profundamente enterrada en las matemáticas de la QCD. Según las reglas matemáticas de la teoría cuántica de campos, los gluones sólo pueden hacer dos cosas: dividirse en dos o emitir un par de quarks. De hecho, pueden hacer las dos.

La idea de las cuerdas elásticas vuelve a aparecer en el estudio de la gravedad cuántica, salvo que ahora todo es más pequeño y más rápido en casi veinte órdenes de magnitud. Estas minúsculas hebras de energía, rápidas y terriblemente poderosas, se denominan *cuerdas fundamentales*⁸².

Permítame decirlo de nuevo para que no haya lugar a confusión: la teoría de cuerdas tiene dos aplicaciones muy diferentes en la física moderna. La aplicación a los hadrones tiene lugar en escalas de tamaño que parecen mínimas para los niveles humanos ordinarios pero son gigantescas desde el punto de vista de la física moderna. Es un hecho aceptado que los tres tipos de hadrones —nucleones, mesones y gluóbolos— son objetos tipo cuerda descritos por las matemáticas de la teoría de cuerdas. Los experimentos de laboratorio que sostienen la teoría de cuerdas hadrónica se remontan a casi medio siglo atrás. Las cuerdas que ligan los hadrones, y que en sí mismas están hechas de gluones, se denominan *cuerdas QCD*. Las cuerdas fundamentales —las asociadas con la gravedad y la física cerca de la escala de Planck— son las que han provocado toda la reciente excitación, controversia, discusiones en blogs y libros polémicos.

Las cuerdas fundamentales pueden ser tan pequeñas respecto a un protón como lo es un protón respecto al estado de Nueva Jersey. Entre ellas, el gravitón es la más importante.

⁸² Si las cuerdas fundamentales son la explicación última de las partículas elementales o sólo otra etapa en la marcha reduccionista hacia cosas más pequeñas es tema de debate. Cualquiera que sea el origen del término, *cuerdas fundamentales* se utiliza ahora por conveniencia.

Las fuerzas gravitatorias son muy similares a las fuerzas eléctricas en muchos aspectos. La ley de fuerzas entre partículas eléctricamente cargadas se denomina ley de Coulomb; la ley de las fuerzas gravitatorias se denomina ley de Newton. Tanto las fuerzas eléctricas como las gravitatorias siguen *leyes de la inversa del cuadrado*. Esto significa que la intensidad de la fuerza decrece de acuerdo con el cuadrado de la distancia. Duplicar la distancia entre partículas tiene el efecto de dividir la fuerza por un factor cuatro; triplicar la distancia disminuye la fuerza en un factor nueve; cuadruplicar la distancia decrece la fuerza en un factor dieciséis, y así sucesivamente. La fuerza de Coulomb entre dos partículas es proporcional al producto de sus cargas eléctricas; la fuerza de Newton es proporcional al producto de sus masas. Éstas son las similitudes, pero también hay diferencias: la fuerza eléctrica puede ser repulsiva (entre cargas del mismo signo) o atractiva (entre cargas opuestas), pero la gravedad es siempre atractiva.

Una similitud importante es que ambos tipos de fuerzas pueden producir ondas. Imaginemos lo que sucede con la fuerza entre dos partículas distantes cargadas si una de ellas se mueve repentinamente —digamos que se aleja de la otra carga. Cabría pensar que la fuerza sobre la segunda partícula cambiará instantáneamente cuando se desplaza la primera. Pero hay algo erróneo en esta imagen. Si la fuerza sobre una carga distante fuera realmente a cambiar repentinamente, sin un retardo, podríamos utilizar este efecto para enviar mensajes instantáneos a regiones distantes en el espacio. Pero los mensajes instantáneos violan uno

de los principios más profundos de la Naturaleza. Según la teoría de la relatividad especial, ninguna señal puede viajar a mayor velocidad que la luz. No se puede enviar un mensaje de un punto a otro en menos tiempo del que tarda la luz en viajar entre ambos.

De hecho, la fuerza sobre una partícula distante no cambia instantáneamente cuando se mueve repentinamente una partícula cercana. En su lugar se difunde una perturbación (a la velocidad de la luz) desde la partícula desplazada. La fuerza sobre la partícula distante sólo cambia cuando la perturbación la alcanza. La perturbación que se difunde se parece a una onda oscilante. Cuando la onda llega finalmente, sacude a la segunda partícula y la hace comportarse como un corcho que flota en un estanque cuando pasa un rizo del agua.

La situación es análoga cuando se trata de la gravedad. Imaginemos una mano gigante que sacude el Sol. El movimiento del Sol no se dejará sentir en la Tierra durante ocho minutos, el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia entre ambos. El «mensaje» se difunde, de nuevo a la velocidad de la luz, en forma de un *rizo de curvatura* o una *onda gravitatoria*. Las ondas gravitatorias son a la masa lo que las ondas electromagnéticas son a la carga eléctrica.

Añadamos ahora algo de teoría cuántica. Como sabemos, la energía de las ondas electromagnéticas oscilantes viene en cuantos indivisibles llamados fotones. Planck y Einstein tenían muy buenas razones para creer que la energía oscilante viene en unidades discretas, y a menos que estemos equivocados, esos mismos

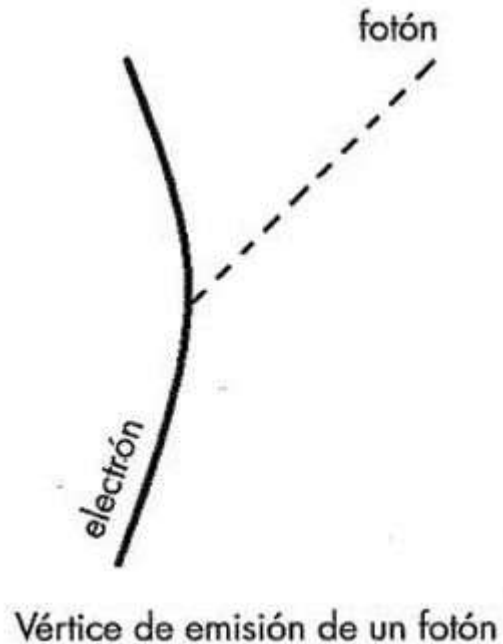
argumentos se aplican a las ondas gravitatorias. Los cuantos del campo gravitatorio se llaman *gravitones*.

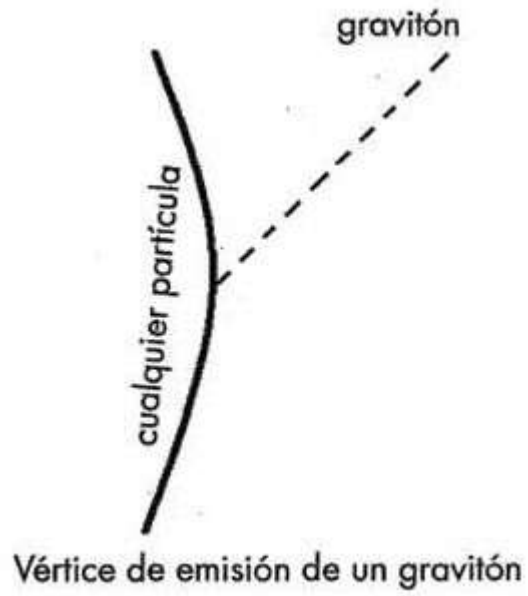
Debería decir aquí que la existencia de gravitones, a diferencia de los fotones, es una conjetura no demostrada experimentalmente; una conjetura que la mayoría de los físicos piensan que está basada en principios sólidos, pero una conjetura en cualquier caso. Aun así, la lógica que hay tras la existencia de los gravitones es convincente para muchos físicos que han reflexionado sobre ello.

La similitud entre fotones y gravitones plantea preguntas interesantes. La radiación electromagnética se explica (en teoría cuántica de campos) mediante

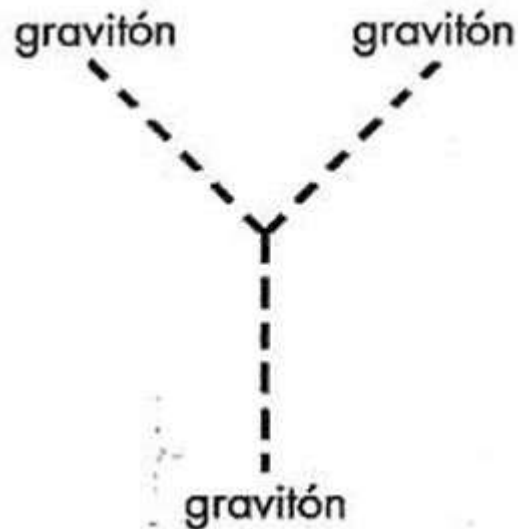
un diagrama de vértice en el que una partícula cargada —un electrón, por ejemplo— emite un fotón.

Es natural esperar que las ondas gravitatorias se crean cuando las partículas emiten gravitones. Puesto que todo gravita, todas las partículas deben poder emitir gravitones.





Incluso un gravitón puede emitir un gravitón.



Por desgracia, incluir gravitones en los diagramas de Feynman lleva a una catástrofe matemática. Durante casi medio siglo, los físicos teóricos han tratado de dar sentido a una teoría cuántica de campos

de gravitones, y los repetidos fracasos nos han convencido a muchos de nosotros de que es una tarea imposible.

El problema con la teoría cuántica de campos

Uno de los incidentes más divertidos durante mi viaje a Cambridge de 1994 ocurrió durante un almuerzo con mi viejo amigo *sir* Roger Penrose. *Sir* Roger acababa de convertirse en *sir* Roger, y Anne y yo hicimos una visita a Oxford para felicitarle.

Nosotros cuatro —Roger, yo y nuestras esposas— estábamos en la orilla del río Cherwell, en un agradable restaurante al aire libre, observando a los punteros que pasaban. Puntear, en el caso de que usted no esté muy familiarizado con este deporte, es una forma de remar utilizando una larga pértiga para empujar la barca a un ritmo relajado. Es una actividad bucólica que siempre me hace pensar en *Almuerzo a orillas del río* de Renoir, pero tiene sus peligros. Cuando pasó una barca con un grupo de estudiantes cantando, la chica que manejaba la pértiga la dejó clavada en el lodo. Reacia a dejarla, ella nos proporcionó entretenimiento durante el almuerzo, agarrándose frenéticamente a la pértiga mientras la barca se alejaba.

Mientras, nosotros cuatro estábamos concentrados en una única *mousse* de chocolate que compartíamos como postre. Las mujeres habían consumido su parte, y Roger y yo, mientras reíamos por la remera en apuros (quien también reía), dábamos cuenta del resto del negro y deliciosos chocolate. Empecé a advertir con cierta fascinación que a medida que Roger y yo alternábamos cucharaditas de chocolate, cada uno de nosotros cortaba la mitad

de lo que quedaba por la mitad. Roger también lo advirtió, y así empezó una competición para ver quién era capaz de dividir el último fragmento restante.

Roger comentó que los griegos se habían preguntado si la materia era infinitamente divisible, o si había un mínimo fragmento indivisible de cada sustancia, lo que ellos llamaban un átomo. «¿Crees que hay átomos de chocolate?», pregunté. Roger dijo que no recordaba si el chocolate era uno de los elementos de la tabla periódica. En cualquier caso, finalmente dividimos la *mousse* en lo que parecía el más pequeño átomo de chocolate y, si la memoria no me engaña, fue Roger quien lo consiguió. El incidente del remo también terminó felizmente cuando llegó la barca siguiente.

El problema con la teoría cuántica de campos es que está basada en la idea de que el espacio (y el espacio-tiempo) es como una *mousse* de chocolate infinitamente divisible. Por muy finamente que se corte, siempre puede subdividirse todavía más. Todos los grandes rompecabezas de las matemáticas tratan del infinito: ¿Cómo pueden los números continuar indefinidamente, y cómo pueden no hacerlo? ¿Cómo puede ser el espacio infinitamente divisible, y cómo no puede serlo? Sospecho que el infinito ha sido una causa fundamental de locura entre matemáticos.

Locura o no, un espacio infinitamente divisible es lo que los matemáticos llaman un *continuo*. El problema con un continuo es que muchísimas cosas pueden ocurrir en las distancias más pequeñas. De hecho, un continuo no tiene distancia más pequeña; uno puede desaparecer en una regresión infinita de celdas cada vez

más pequeñas, y pueden ocurrir cosas en cada nivel. Por decirlo de otra manera, un continuo puede mantener un número infinito de bits de información en cada minúsculo volumen de espacio, por pequeño que sea.

El problema de lo infinitamente pequeño es especialmente difícil en mecánica cuántica, donde cualquier cosa que pueda agitarse se agita, y «todo lo que no está prohibido es obligatorio». Incluso en el espacio vacío en el cero absoluto, los campos, tales como los campos eléctrico y magnético, fluctúan. Estas fluctuaciones tienen lugar en cada escala, desde las mayores longitudes de onda de miles de millones de años luz hasta las dimensiones no mayores que un punto matemático. Esta agitación de campos cuánticos puede almacenar una infinidad de información en cada minúsculo volumen. Ésta es una receta para un desastre matemático.



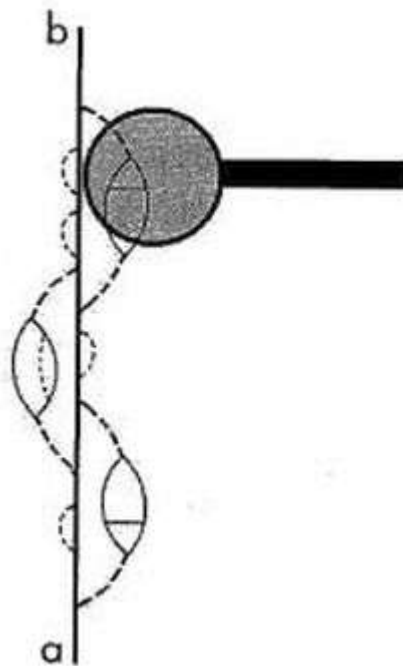
El número potencialmente infinito de bits en cada pequeño volumen se manifiesta en los diagramas de Feynman como una regresión infinita de subdiagramas cada vez más pequeños. Empecemos con la simple idea de un propagador que muestra un electrón que se mueve desde un punto del espacio-tiempo a otro. Empieza y termina con un solo electrón.



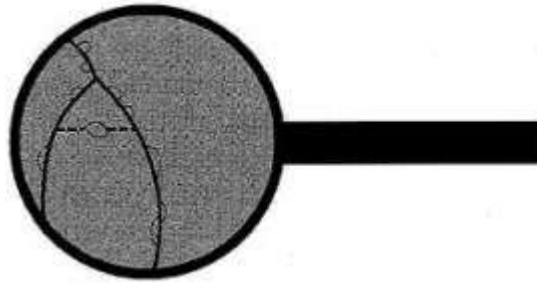
El electrón tiene otras maneras de ir de a a b; por ejemplo, emitiendo y absorbiendo fotones a lo largo del camino.

Obviamente, las posibilidades no tienen fin, y según las reglas de Feynman, todas tienen que sumarse para hallar la probabilidad

real. Cada diagrama puede ser decorado con más estructura. Cada propagador y cada vértice pueden reemplazarse por una historia más complicada que incluye diagramas dentro de diagramas, hasta que son demasiado pequeños para ver. Pero con ayuda de una lente de aumento muy potente puede añadirse estructura aún más fina, sin límite.



El potencial infinito para añadir estructura cada vez más pequeña al diagrama de Feynman es una de las consecuencias inquietantes del continuo espacio-temporal de la teoría cuántica de campos: *mousse* de chocolate hasta el final.



Con todo esto, apenas sorprende que la teoría cuántica de campos sea una disciplina matemáticamente peligrosa. No es fácil hacer que todas las fluctuaciones en las infinitas celdas infinitesimalmente pequeñas del espacio se ensamblen en un universo coherente. De hecho, la mayoría de las versiones de la teoría cuántica de campos se descontrolan y generan absurdos. Incluso es posible que el modelo estándar de las partículas elementales no sea matemáticamente consistente en el análisis final.

Pero nada es comparable a las dificultades de intentar construir una teoría cuántica de campos de la gravedad. Recordemos que la gravedad es geometría. Al tratar de combinar la relatividad general con la mecánica cuántica, al menos de acuerdo con las reglas de la teoría cuántica de campos, encontramos que el propio espacio-tiempo está variando de forma constantemente. Si usted fuera capaz de ampliar una minúscula región del espacio, vería que el espacio se agita violentamente y se retuerce en minúsculos grumos y nudos de curvatura. Además, cuanto más ampliara, más violentas se harían las fluctuaciones.

Los hipotéticos diagramas de Feynman que incluyen gravitones reflejan esta perversidad. La infinidad de diagramas cada vez más

pequeños se descontrola por completo. Todo intento por dar sentido a una teoría cuántica de campos de la gravedad ha llevado a la misma conclusión: están sucediendo demasiadas cosas en las escalas de distancia más pequeñas. Aplicar métodos convencionales de teoría cuántica de campos a la gravedad lleva a un fiasco matemático.

Los físicos tienen una manera de evitar el desastre del espacio infinitamente divisible: pretenden que el espacio, como una *mousse* de chocolate, no es un verdadero continuo. La suposición es que si uno divide el espacio más allá de un cierto punto, descubrirá una pepita indivisible que ya no puede dividirse. Por decirlo de otra manera, dejan de dibujar diagramas de Feynman cuando la subestructura se hace demasiado pequeña. Una limitación sobre la pequeñez de las cosas se denomina un *corte*. Básicamente, un corte no es otra cosa que dividir el espacio en vóxeles indivisibles y no permitir nunca más de un bit por vóxel.

Los físicos llevan tiempo especulando que la longitud de Planck es el átomo último de espacio. Los diagramas de Feynman, incluso los que incluyen gravitones, tienen perfecto sentido siempre que se dejen de añadir estructuras más pequeñas que la longitud de Planck, o al menos ése es el argumento. Ésta era la expectativa casi universal sobre el espacio-tiempo: tendría una estructura indivisible, granular y voxelada en la escala de Planck.

Pero eso era antes del descubrimiento del principio holográfico. Como vimos en el capítulo 18, reemplazar el espacio continuo por una matriz de vóxeles de tamaño de Planck es una idea errónea.

Voxelar el espacio sobreestima enormemente la cantidad de variación que puede darse en una región. Habría llevado a Ptolomeo a la falsa conclusión sobre el número de bits que su biblioteca podría mantener, y llevaría a los físicos teóricos a la errónea conclusión sobre la cantidad de información que puede almacenar una región del espacio.

Casi desde el primer momento se apreció que la teoría de cuerdas resuelve el rompecabezas de los diagramas de Feynman infinitamente pequeños. Lo hace en parte eliminando la idea de una partícula infinitamente pequeña. Pero hasta la llegada del principio holográfico no se apreció cuán radicalmente diferente es la teoría de cuerdas de un corte o una versión voxelada de la teoría cuántica de campos. El hecho notable es que la teoría de cuerdas es quintaesencialmente una teoría holográfica que describe un universo pixelado.

La teoría de cuerdas moderna, igual que su más antigua encarnación, tiene cuerdas abiertas y cuerdas cerradas. En la mayoría de las versiones de la teoría, aunque no en todas, un fotón es una cuerda abierta similar a un mesón, pero mucho más pequeña. En todas las versiones, el gravitón es una cuerda cerrada que se parece mucho a una gluébola en miniatura. ¿Sería posible que, en algún sentido profundo e inesperado, estos dos tipos de cuerdas —cuerdas fundamentales y cuerdas QCD— sean de algún modo los mismos objetos? A la vista de la discrepancia en sus tamaños, parecería poco probable, pero los teóricos de cuerdas están empezando a sospechar que la enorme diferencia entre

escalas es equívoca. En el capítulo 23 veremos que hay una unidad para la teoría de cuerdas, pero por ahora consideraremos las dos versiones de la teoría de cuerdas como fenómenos distintos.

Una cuerda es cualquier objeto flexible que es mucho más largo que grueso: los cordones de los zapatos y los sedales de pesca son cuerdas. En física, la palabra *cuerda* implica también elasticidad: las cuerdas son extensibles además de poderse curvar, como las cuerdas de *puenting* y gomas elásticas. Las cuerdas QCD son fuertes —se podría levantar un camión de gran tamaño en el extremo de un mesón— pero las cuerdas fundamentales son aún más resistentes. En realidad, pese a la extrema delgadez de las cuerdas fundamentales, son increíblemente resistentes, mucho más resistentes que cualquier cosa hecha de materia normal. El número de camiones que podrían colgarse de una cuerda fundamental es del orden de 10^{40} . Esta enorme resistencia hace extraordinariamente difícil estirar de manera apreciable una cuerda fundamental. Como resultado, el tamaño típico de una cuerda fundamental puede ser casi tan pequeño como la longitud de Planck.

La mecánica cuántica no desempeña un papel importante en las cuerdas que encontramos en la vida cotidiana —las cuerdas de *puenting*, gomas elásticas y masas de goma estirada— pero tanto las cuerdas QCD como las fundamentales son altamente mecano-cuánticas. Esto significa, entre otras cosas, que la energía sólo puede añadirse en unidades discretas e indivisibles. Pasar de un

valor de la energía a otro sólo puede hacerse en «saltos cuánticos» en la escalera de los niveles de energía.

El punto más bajo de la escalera de energía se denomina *estado fundamental*. Añadir una simple unidad de energía lleva al *primer estado excitado*. Otro paso en la energía lleva al segundo estado excitado, y así sucesivamente subiendo escalones. Las partículas elementales ordinarias, tales como electrones y fotones, están en el punto bajo de la escalera. Si vibran, lo hacen sólo con movimiento de punto cero cuántico. Pero si la teoría de cuerdas es correcta, pueden hacerse rotar y vibrar con energía incrementada (y por consiguiente masa incrementada).

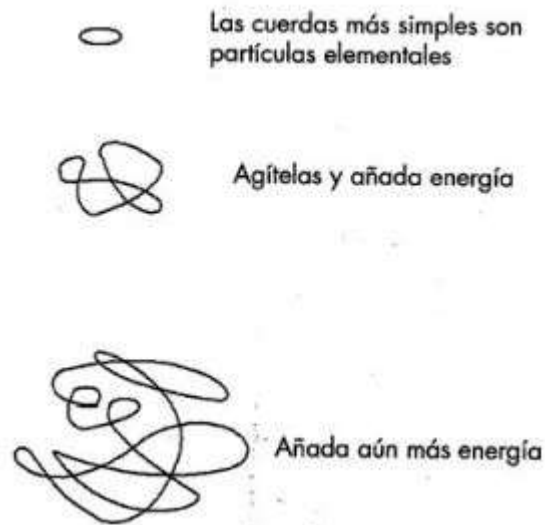
Una cuerda de guitarra puede ser excitada tañéndola con una púa, pero como usted puede imaginar, una púa de guitarra es demasiado grande para tañer un electrón. La forma más sencilla es golpear el electrón con otra partícula. En efecto, utilizamos una partícula como «púa» para tañer la otra. Si la colisión es suficientemente violenta, ambas cuerdas quedarán vibrando en estados excitados. La siguiente pregunta obvia es, «¿Por qué los físicos experimentales no excitan electrones o fotones en los aceleradores y zanzan, de una vez por todas, la cuestión de si las partículas son cuerdas fundamentales vibrantes?». El problema está en el tamaño del escalón: sencillamente es demasiado grande. La energía necesaria para hacer girar o vibrar un hadrón es modesta para los niveles de la física de partículas moderna, pero la energía necesaria para excitar una cuerda fundamental es escandalosamente grande. Añadir una unidad de energía a un electrón aumentaría su masa

hasta casi la masa de Planck. Aún peor, la energía debe concentrarse en un espacio increíblemente pequeño. Hablando en términos generales, tendríamos que comprimir la masa de un trillón de protones en un diámetro un trillón de veces más pequeño que un protón. Ningún acelerador puede hacerlo. No se ha hecho nunca, y probablemente nunca se hará⁸³.

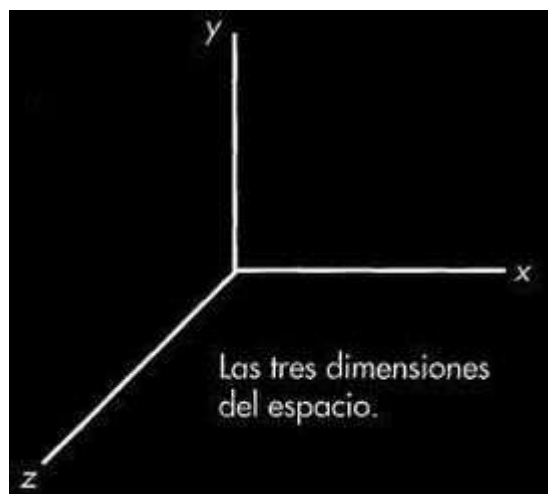
Las cuerdas que están muy excitadas son más grandes en promedio que sus contrapartidas en el estado fundamental; la energía adicional las agita y estira hasta una gran longitud. Si usted pudiera bombardear una cuerda con suficiente energía, se difundiría y se haría tan grande como un ovillo enredado que se agita violentamente. Y no hay límite; con más energía todavía, la cuerda podría ser excitada hasta cualquier tamaño.

Hay una forma de que cuerdas enormemente excitadas se creen en la Naturaleza, si no en el laboratorio. Como veremos en el capítulo 21, los agujeros negros —incluso los agujeros negros gigantes en los centros de las galaxias— son «cuerdas monstruo» enredadas y enormemente grandes.

⁸³ Por esto es por lo que algunos físicos afirman que la teoría de cuerdas sigue siendo una teoría no demostrada experimentalmente. Hay razones para esta afirmación, pero la culpa no es tanto de los físicos teóricos como de los experimentales. Estos holgazanes tienen que salir y construir un acelerador de tamaño galáctico. ¡Ah!, y también recoger los billones de barriles de petróleo que se necesitarían cada segundo para alimentarlo.



Hay aún otra consecuencia importante y fascinante de la mecánica cuántica, que es muy sutil y demasiado técnica para explicar en estas páginas. El espacio que percibimos normalmente es tridimensional. Hay muchos términos para las tres dimensiones: por ejemplo, longitud, latitud y altitud; o longitud, anchura y altura. Los matemáticos y los físicos suelen describir las dimensiones utilizando tres ejes etiquetados x , y y z .



Pero las cuerdas fundamentales no se contentan con sólo tres dimensiones en las que moverse. Quiero decir con esto que las matemáticas sutiles de la teoría de cuerdas se descontrolan a menos que se añadan más dimensiones. Los teóricos de cuerdas descubrieron hace muchos años que la consistencia matemática de sus ecuaciones se rompe a menos que se añadan *seis dimensiones más de espacio*. Siempre he pensado que si una cosa se entiende suficientemente bien, debería ser posible explicarla en términos no técnicos. Pero la necesidad de la teoría de cuerdas de seis dimensiones extra ha eludido una explicación sencilla, incluso después de más de treinta y cinco años. Me temo que tendré que tomar la salida tramposa y decir, «puede demostrarse que...».

Me sorprendería mucho encontrar a alguien que pueda visualizar cuatro o cinco dimensiones, y no digamos nueve⁸⁴. Yo no puedo hacerlo mejor que usted, pero puedo añadir seis letras más del alfabeto —*r, s, t, u, v, w*— a las habituales *x, y* y *z*, y luego manejar los símbolos utilizando álgebra y cálculo infinitesimal. Con nueve direcciones para moverse, «puede demostrarse que» la teoría de cuerdas es matemáticamente consistente.

Ahora puede usted preguntarse: si la teoría de cuerdas requiere nueve dimensiones y observamos que el espacio sólo tiene tres, ¿no significa esa evidencia *prima facie* que la teoría de cuerdas es errónea? Pero no es tan sencillo. Muchos físicos famosos —incluidos Einstein, Wolfgang Pauli, Felix Klein, Steven Weinberg, Murray Gell-Man y Stephen Hawking (ninguno de ellos teórico de cuerdas)— han

⁸⁴ A menudo se oye que la teoría de cuerdas es decadimensional. La dimensión adicional no es otra que el tiempo. En otras palabras, la teoría de cuerdas es $(9 + 1)$ -dimensional.

contemplado seriamente la idea de que el espacio tiene más de tres dimensiones. Obviamente no estaban alucinando, de modo que debe haber alguna manera de ocultar la existencia de dimensiones extra. Las palabras técnicas para dimensiones extra ocultas son *compacta*, *compactificar* y *compactificación*: los teóricos de cuerdas hacen compactas las seis dimensiones extra del espacio, y así las compactifican por el proceso de compactificación. La idea es que las dimensiones extra pueden enrollarse en nudos muy pequeños, de modo que nosotros somos criaturas enormes demasiado grandes para movernos en ellas, o incluso para advertirlas siquiera.

La noción de que una o más dimensiones del espacio están enrolladas en geometrías minúsculas, y por lo tanto son demasiado pequeñas para ser detectadas, es un tema común en buena parte de la moderna física de altas energías. Algunos piensan que la idea de *dimensiones extra* es demasiado especulativa —«ciencia-ficción con ecuaciones», como dijo un ingenioso—. Pero eso es un malentendido basado en la ignorancia. Todas las teorías modernas de las partículas elementales hacen uso de alguna forma de dimensiones extra para proporcionar la maquinaria ausente que hace complicadas las partículas.

Los teóricos de cuerdas no inventaron el concepto de dimensiones extra, pero lo han utilizado de formas particularmente creativas. Aunque la teoría de cuerdas requiere seis dimensiones extra, podemos hacernos una idea general añadiendo tan sólo una nueva dimensión al espacio. exploremos el concepto de dimensión extra en su contexto más simple. Partiendo de un mundo con una sola

dimensión espacial —llamémosle Linealandia— añadiremos una dimensión compacta extra. Localizar un punto en Linealandia sólo requiere una coordenada; los habitantes la llaman X .

Para hacer Linealandia interesante necesitamos añadir algunos objetos, de modo que vamos a crear partículas que se muevan a lo largo de la línea.



Considerémoslas como minúsculas cuentas que pueden adherirse para formar átomos, moléculas y quizá incluso criaturas vivas unidimensionales. (Dudo bastante que pueda existir vida en un mundo con una sola dimensión, pero suspendamos la creencia a este respecto). Consideremos que la línea y las cuentas son infinitamente delgadas de modo que no se adhieren en las otras dimensiones. O incluso mejor, tratemos de visualizar la línea y las cuentas sin las otras dimensiones⁸⁵.

Una persona inteligente podría diseñar muchas versiones alternativas de Linealandia. Las cuentas podrían ser todas iguales o, para hacer un mundo más interesante, podrían existir varios tipos diferentes de cuentas. Para seguir la pista de los diferentes tipos, podríamos etiquetarlos mediante colores: rojo, azul, verde y demás. Puedo imaginar un sinfín de posibilidades: las cuentas rojas atraen a las cuentas azules pero repelen a las cuentas verdes. Las cuentas negras son muy pesadas, pero las cuentas blancas no

⁸⁵ El modelo CGHS que expliqué en el capítulo 15 es Linealandia, pero con un agujero negro masivo (y sin duda peligroso) en el extremo del espacio de los linealandeses.

tienen masa y se mueven en Linealandia a la velocidad de la luz. Incluso podríamos admitir que las cuentas sean mecano-cuánticas, y que el color de una cuenta dada sea incierto.

La vida en una sola dimensión está muy limitada. Teniendo que moverse a lo largo de una línea, los linealandeses invariablemente chocan unos con otros. ¿Pueden comunicarse? Fácilmente: pueden lanzarse sus cuentas extremas uno a otro para enviar mensajes. Pero su vida social es muy aburrida; cada criatura sólo tiene dos conocidos, uno a la derecha y otro a la izquierda. Se necesitan al menos dos dimensiones para tener un círculo social.

Pero las apariencias engañan. Cuando los linealandeses miran a través de un microscopio muy potente, se sorprenden al descubrir que su mundo es en realidad bidimensional. Lo que ven no es una línea matemática ideal de grosor cero, sino más bien la superficie de un cilindro. En circunstancias normales la circunferencia del cilindro es demasiado pequeña para ser detectada por los linealandeses, pero bajo el microscopio se descubren objetos mucho menores, más pequeños incluso que los átomos de Linealandia — objetos tan pequeños que pueden moverse en *dos* direcciones.



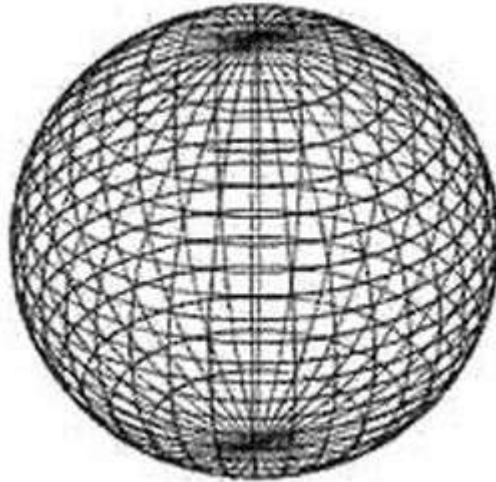
Como sus hermanos brobdingnagianos, estos liliputienses de Linealandia pueden moverse a lo largo de la longitud del cilindro, pero son suficientemente pequeños para moverse también alrededor

de su circunferencia. Incluso pueden moverse en ambas direcciones simultáneamente, describiendo una espiral alrededor del cilindro. ¡Incluso pueden pasar uno junto a otro sin tropezar! Con razón afirman que viven en un espacio bidimensional, pero con una peculiaridad: si se mueven en una línea alrededor de la dimensión extra, pronto vuelven al mismo lugar.

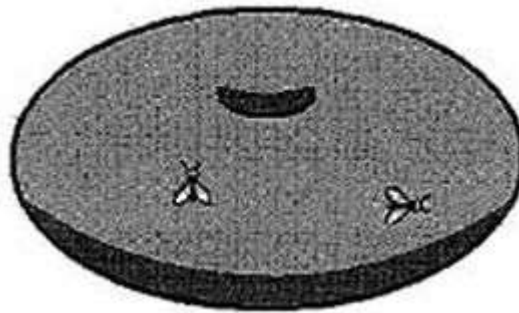
Los linealandeses necesitan un nombre para la nueva dirección, de modo que la llaman Y. Pero a diferencia de X, no pueden moverse muy lejos a lo largo de Y sin volver al punto de partida. Los matemáticos linealandeses dicen que la dirección Y es *compacta*.

El cilindro mostrado arriba es lo que se obtiene añadiendo una dirección compacta extra a un mundo unidimensional original. Añadir seis dimensiones extra a un mundo que ya tiene tres está más allá de la capacidad de visualización del cerebro humano. Lo que separa a físicos y matemáticos de otras personas no es que sean mutantes que pueden visualizar cualquier número de dimensiones, sino más bien que han sufrido un arduo reentrenamiento matemático —de nuevo, ese recableado de la mente— para «ver» las dimensiones extra.

Una única dimensión extra no ofrece muchas oportunidades para la variedad. Moverse en la dirección compacta sería como dar vueltas en un círculo sin advertirlo. Pero tan sólo dos dimensiones extra permiten una inagotable variedad de nuevas oportunidades. Las dos dimensiones extra podrían formar una esfera,



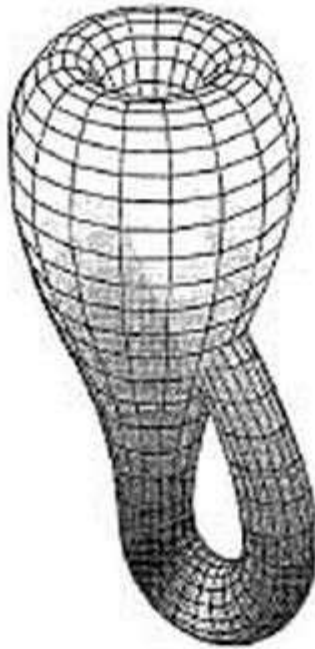
un toro (la superficie de un donut),



un donut con dos o tres agujeros,

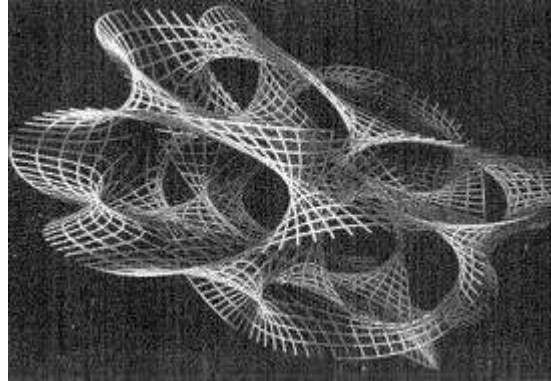


o incluso el extraño espacio llamado la botella de Klein.



Imaginar dos dimensiones extra no es tan difícil —lo acabamos de hacer— pero a medida que crece el número, se hacen cada vez más difíciles de visualizar. Para cuando se llega a las seis dimensiones extra que requiere la teoría de cuerdas, visualizar sin matemáticas se hace imposible. Los espacios geométricos especiales que utilizan los teóricos de cuerdas para compactificar las seis dimensiones extra se llaman *variedades de Calabi Yau*, y hay millones de ellas, sin que haya dos iguales. Las variedades de Calabi Yau son extraordinariamente complejas, con cientos de agujeros de donuts hexadimensionales e inimaginables *pretzels* retorcidos. De todas formas, los matemáticos forman imágenes de ellos seccionándolos en dibujos de dimensión menor, similares a diagramas de inserción.

Ésta es una imagen de una sección bidimensional de un espacio de Calabi Yau típico.



Trataré de darle una idea de cómo se vería el espacio ordinario cuando se añade una variedad de Calabi Yau hexadimensional en cada punto. En primer lugar, examinemos las dimensiones habituales, en las que pueden moverse objetos grandes tales como seres humanos. (Lo he dibujado como bidimensional, pero ahora debería usted ser capaz de añadir la tercera dimensión en su imaginación).

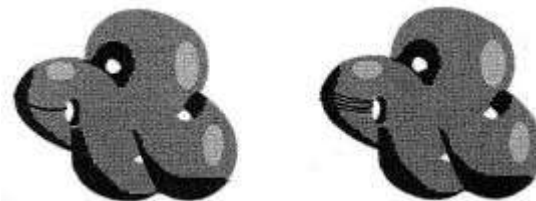


En cada punto del espacio tridimensional existen también otras seis dimensiones compactas en las que pueden moverse objetos muy pequeños. Por necesidad, he dibujado los espacios de Calabi Yau

separados unos de otros, pero usted debería visualizarlos en cada punto del espacio ordinario.

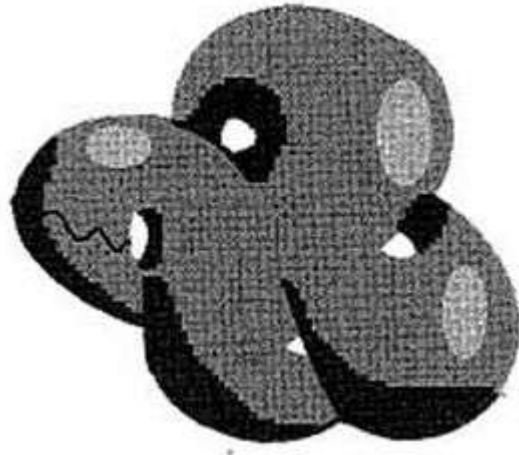


Volvamos ahora a las cuerdas. Una cuerda ordinaria puede estirarse en muchas direcciones; por ejemplo, a lo largo del eje este-oeste, el eje norte-sur o el eje arriba-abajo. Puede estirarse a varios ángulos, tales como al noroeste con una inclinación de 10 grados respecto a la vertical. Pero si hay dimensiones extra, las posibilidades se multiplican. En particular, las cuerdas pueden estirarse alrededor de una dirección compacta. Una cuerda cerrada podría dar una o más vueltas alrededor del espacio de Calabi Yau, y al mismo tiempo no estar estirada en absoluto a lo largo de las direcciones ordinarias del espacio.



Permítame hacerlo aún más complicado. La cuerda podría enrollarse alrededor del espacio compacto y ondular al mismo

tiempo, con ondulaciones que se propagan alrededor de la cuerda como una serpiente.



Estirar una cuerda alrededor de una dirección compacta y hacerla ondular requiere energía, de modo que las partículas descritas por estas cuerdas serán más pesadas que las partículas ordinarias.

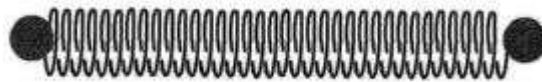
Fuerzas

Nuestro universo es un mundo no sólo de espacio, tiempo y partículas, sino también de fuerzas. Las fuerzas eléctricas que actúan entre partículas cargadas pueden mover trozos de papel y polvo (pensemos en la electricidad estática) pero, lo que es más importante, estas mismas fuerzas mantienen a los electrones del átomo en sus órbitas alrededor de los núcleos. Las fuerzas gravitatorias que actúan entre la Tierra y el Sol mantienen a la Tierra en órbita.

Todas las fuerzas tienen su origen en última instancia en fuerzas microscópicas entre partículas individuales. ¿Pero de dónde vienen

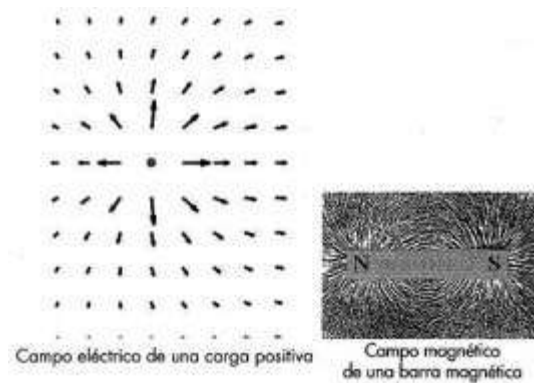
estas fuerzas entre partículas? Para Newton, la fuerza de gravitación universal entre masas era sólo un hecho de la Naturaleza, un hecho que él podía describir pero no explicar. Durante los siglos XIX y XX, sin embargo, físicos tales como Michael Faraday, James Clerk Maxwell, Albert Einstein y Richard Feynman tuvieron brillantes intuiciones que explicaban la fuerza en términos de conceptos subyacentes más básicos.

Según Faraday y Maxwell, las cargas eléctricas no se atraen o se repelen directamente, sino que hay un intermediario en el espacio entre las cargas que transmite la fuerza. Imaginemos un *slinky* — uno de esos muelles de juguete— estirado entre dos bolas separadas.



Cada bola ejerce una fuerza sólo sobre el trozo adyacente del *slinky*. Luego cada trozo del *slinky* ejerce una fuerza sobre sus vecinos. La fuerza se transmite a lo largo del *slinky* hasta que tira el objeto que hay en el otro extremo. Puede parecer como si los objetos estuvieran tirando uno del otro, pero es una ilusión creada por el *slinky* intermedio.

Cuando se trata de partículas cargadas eléctricamente, los agentes intermedios son los campos eléctrico y magnético que llenan el espacio entre ellas. Aunque invisibles, estos campos son muy reales: son perturbaciones suaves e invisibles del espacio que transmiten las fuerzas entre las cargas.



Einstein fue incluso más profundo en su teoría de la gravedad. Las masas distorsionan la geometría del espacio-tiempo en su vecindad, y al hacerlo, distorsionan las trayectorias de otras masas. Las distorsiones de la geometría también pueden considerarse como campos.

Cabría pensar que aquí se acababa todo. Así era, hasta que Richard Feynman apareció con una teoría cuántica de la fuerza, que a primera vista parecía completamente diferente de la teoría de campos de Faraday-Maxwell-Einstein. Su teoría parte de la idea de que las partículas eléctricamente cargadas pueden emitir (lanzar) y absorber (recoger) fotones. No había nada controvertido en esa idea; hacía tiempo que se había entendido que se emiten rayos X cuando los electrones son abruptamente frenados por un obstáculo en un tubo de rayos X. El proceso inverso de absorción era ya parte del artículo de Einstein en el que introdujo por primera vez la idea de cuantos de luz.

Feynman imaginaba una partícula cargada como un malabarista de fotones, que constantemente emite, absorbe y crea numerosos

fotones en el espacio que rodea a la carga. Un electrón, en reposo, es un malabarista perfecto, que nunca falla las recogidas. Pero igual que le sucede a un malabarista humano en un vagón de tren, la aceleración repentina puede trastocar las cosas. Las cargas pueden ser apartadas de su posición, lo que hace que estén en el lugar equivocado para absorber el fotón. El electrón no recogido sale disparado y se convierte en un bit de luz irradiada.

Volviendo al vagón de tren, el compañero del malabarista sube al tren y los dos deciden practicar un juego de equipo coordinado. En general, cada malabarista recoge sus propios lanzamientos, pero cuando se acercan lo suficiente, cada uno de ellos puede recoger ocasionalmente una bola lanzada por el otro. Lo mismo sucede cuando se acercan dos cargas eléctricas. Las nubes de fotones que rodean las cargas se mezclan, y una carga puede absorber un fotón emitido por la otra. El proceso se llama *intercambio de fotones*.

Como resultado del intercambio de fotones, unas cargas ejercen fuerzas sobre otras. La difícil cuestión de si la fuerza es atractiva (un tirón) o repulsiva (un empujón) puede ser respondida sólo por las sutilezas de la mecánica cuántica. Baste decir que cuando Feynman hizo los cálculos encontró lo mismo que habían predicho Faraday y Maxwell: las cargas eléctricas iguales se repelen, y las cargas opuestas se atraen.

Es interesante comparar las habilidades malabares de los electrones con los malabaristas humanos. Un ser humano puede hacer algunos lanzamientos y recogidas por segundo, pero un electrón emite y absorbe unos 10^{19} fotones cada segundo.

Según la teoría de Feynman, toda la materia hace juegos malabares, no sólo las cargas eléctricas. Toda forma de materia emite y absorbe gravitones —los cuantos del campo gravitatorio—. La Tierra y el Sol están rodeados de nubes de gravitones que se entremezclan e intercambian. El resultado es la fuerza gravitatoria que mantiene a la Tierra en órbita.

Entonces, ¿con qué frecuencia un único electrón emite un gravitón? La respuesta es sorprendente: casi nunca. Se necesita de media un tiempo mayor que la edad del universo para que un electrón emita un sólo gravitón. Ésa es la razón por la que, según la teoría de Feynman, la fuerza gravitatoria entre partículas elementales es tan débil comparada con las fuerzas eléctricas.

Entonces, ¿cuál es la teoría correcta: la teoría de campos de Faraday-Maxwell-Einstein o la teoría del lanzamiento de partículas de Feynman? Suenan demasiado diferentes para que ambas sean ciertas.

Pero lo son. La clave está en la complementariedad cuántica entre ondas y partículas que expliqué en el capítulo 4. Las ondas son un concepto propio de campos: las ondas de luz no son otra cosa que una rápida oscilación de los campos electromagnéticos. Pero la luz es partículas: fotones. Por eso, la imagen corpuscular de la fuerza de Feynman y la imagen de campos de Feynman son un ejemplo más de complementariedad cuántica. El campo cuántico creado por la nube de partículas lanzadas se llama un *condensado*.

Un chiste de cuerdas

Permítame contarle el último chiste que corre entre los teóricos de cuerdas.

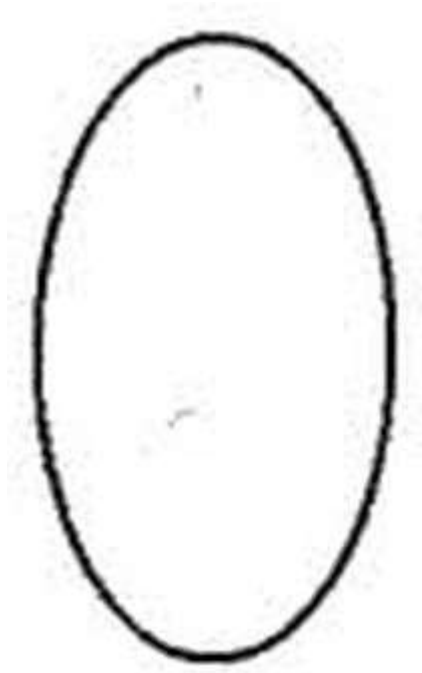
Dos cuerdas entran en un bar y piden un par de cervezas. El camarero dice a una de ellas: «Hola, cuánto tiempo sin verte. ¿Cómo estás?». Luego se gira hacia la otra cuerda y dice, «Tú eres nueva aquí, ¿verdad?». La segunda cuerda responde: «No, yo soy un nudo deshilachado».

Bueno, ¿qué esperaba usted de un teórico de cuerdas?

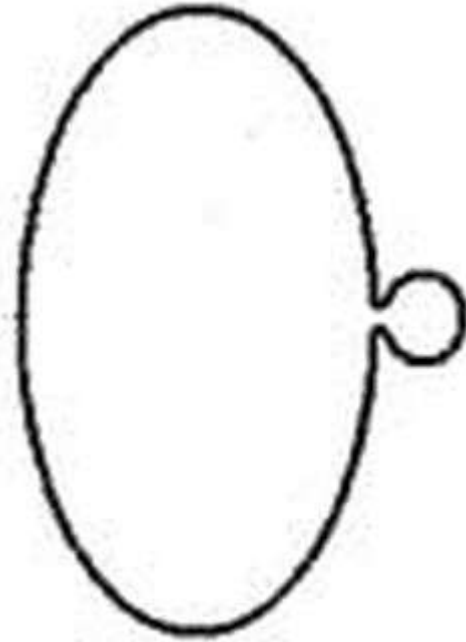
El chiste termina aquí, pero la historia continúa. El camarero se siente un poco mareado. Quizá; es el resultado de demasiados tragos clandestinos detrás de la barra, o quizá las fluctuaciones cuánticas intermitentes de los dos clientes le están mareando. Pero no; hay algo más que las agitaciones estándar: las cuerdas parecen estar moviéndose de forma muy extraña, como si una fuerza oculta estuviera tirando de ellas y juntándolas. Cada vez que una cuerda hace un movimiento repentino, un instante después la otra se siente atraída hacia su taburete, y viceversa. Pero no parece que haya nada que las conecte.

Fascinado por el extraño comportamiento, el camarero mira el espacio que hay entre ellas en busca de una clave. Al principio, todo lo que puede ver es un brillo tenue, una mareante distorsión de la geometría; pero después de observar fijamente durante un minuto, advierte que pequeños trozos de cuerda se están desprendiendo constantemente de los cuerpos de los dos clientes, formando un condensado entre ellos. Es el condensado el que está tirando de ellas.

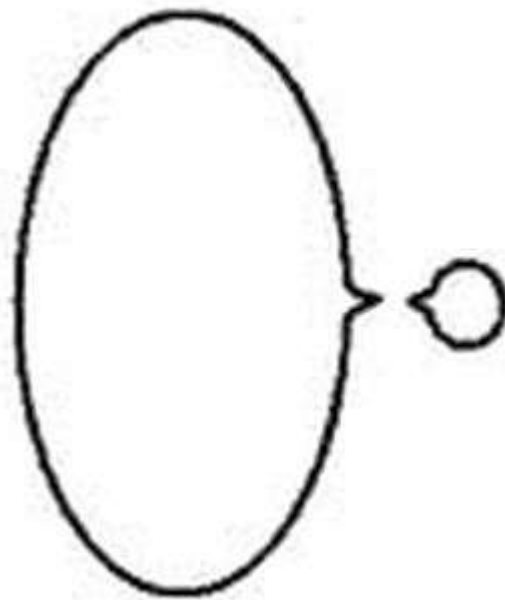
Las cuerdas emiten y absorben otras cuerdas. Tomemos el caso de cuerdas cerradas. Además de agitarse con movimiento de punto cero, una cuerda cuántica puede dividirse en dos cuerdas. Describiré este proceso en el capítulo 21, pero por ahora una simple figura debería darle la idea. Ésta es una imagen de una cuerda cerrada.



La cuerda se curva en una especie de movimiento de pinzamiento hasta que aparece un apéndice parecido a una oreja.

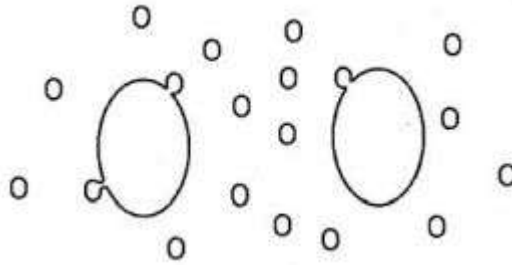


La cuerda está ahora lista para dividirse, emitiendo un pequeño fragmento de sí misma.



También es posible lo contrario: una cuerda pequeña, que encuentra a una segunda cuerda más grande, puede ser absorbida por el proceso inverso.

Lo que veía el camarero era un condensado de cuerdas pequeñas, como una nube de moscas cuánticas, que rodeaba a sus clientes. Pero cuando miraba menos de cerca, el condensado borroso parecía simplemente distorsionar su visión, exactamente como haría una región de espacio-tiempo curvo.



Los pequeños lazos cerrados de cuerda son gravitones, zumbando alrededor de cuerdas más grandes y formando un condensado que imita estrechamente los efectos de un campo gravitatorio. Los gravitones —los cuantos del campo gravitatorio— son similares en estructura a las gluébolos de la física nuclear, pero 10^{19} veces más pequeños. Uno se pregunta qué significa todo esto, si es que significa algo, para la física nuclear.

Algunos físicos en otros campos de la física han encontrado irritante el entusiasmo de los teóricos de cuerdas. Los teóricos de cuerdas argumentan que «las bellas, elegantes, consistentes y robustas matemáticas de la teoría de cuerdas llevan al hecho fantástico, sorprendente e increíble de las fuerzas gravitatorias, de modo que

debe ser correcta». Pero para los escépticos, ninguna cantidad de superlativos, incluso si están justificados, equivale a un argumento convincente. Si la teoría de cuerdas es la teoría correcta de la Naturaleza, la manera de confirmarla es mediante predicciones experimentales y test empíricos convincentes, y no con superlativos. Tienen razón, pero también la tienen los teóricos de cuerdas. El problema real está en la extrema dificultad de experimentar con objetos un trillón de veces más pequeños que un protón. Pero ya llegue o no la teoría de cuerdas a ser finalmente confirmada por datos experimentales, en el ínterin es un laboratorio matemático consistente en el que podemos poner a prueba varias ideas acerca de cómo encaja la gravedad con la mecánica cuántica.

Dada la emergencia de la gravedad en la teoría de cuerdas, podemos suponer que cuando se junten cuerdas suficientemente masivas se formará un agujero negro. Por ello, la teoría de cuerdas es un marco en el que puede examinarse la paradoja de Hawking. Si Hawking está en lo cierto cuando afirma que los agujeros negros provocan inevitablemente pérdida de información, las matemáticas de la teoría de cuerdas deberían mostrarnos cómo es posible que la información escape de un agujero negro.

Durante el período de principios de los años noventa en que Gerard 't Hooft y yo nos encontramos dos veces en Stanford y una vez en Utrecht (si la memoria no me engaña), 't Hooft desconfiaba en general de la teoría de cuerdas, pese al hecho de que él escribió uno de los artículos seminales que explicaban la relación entre la teoría de cuerdas y la teoría cuántica de campos. Nunca he estado seguro

de cuál era la causa de su disgusto, pero puedo conjeturar que parte del mismo tenía que ver con el hecho de que desde 1985 la comunidad de la física teórica norteamericana se había hecho abrumadoramente homogénea, dominada por los teóricos de cuerdas. 't Hooft, siempre llevando la contraria, cree (como yo) que hay fuerza en la diversidad. Cuantas más formas diferentes hay de acercarse a una cuestión, y más estilos de pensamiento diferentes pueden cultivarse, mayores son las probabilidades de resolver los problemas realmente difíciles de la ciencia.

Sin embargo, había más en el escepticismo de Gerard que sólo irritación por el dominio de la física por parte de un grupo demasiado estrecho. Por lo que puedo decir, él acepta que hay un valor en la teoría de cuerdas, pero se rebela contra la afirmación de que la teoría de cuerdas es la «teoría final». La teoría de cuerdas se descubrió por accidente y su desarrollo procedió a trompicones. En ningún momento tuvimos un conjunto global de principios o un pequeño conjunto de ecuaciones definitorias. Incluso hoy consiste en una malla interrelacionada de hechos matemáticos que se han mantenido unidos con notable consistencia, pero esos hechos no llegan a ser un conjunto compacto de principios como el que caracteriza la teoría de la gravedad de Newton, la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica. En su lugar, hay un montón de piezas que encajan como un rompecabezas muy complicado cuya imagen global sólo percibimos tenuemente. Recordemos la cita de 't Hooft con que se abre este capítulo: «Imagine que le doy un sillón, mientras le explico que todavía faltan

las patas, y que el asiento, el respaldo y los brazos quizá llegarán pronto; ¿podría seguir llamando sillón a cualquier cosa que le diera?».

Es verdad que la teoría de cuerdas no es todavía una teoría perfecta, pero por el momento es con mucho nuestra mejor guía matemática hacia los principios últimos de la gravedad cuántica. Y, podría añadir, ha sido el arma más poderosa en la guerra de los agujeros negros, en particular al confirmar las creencias del propio Gerard.

En los tres capítulos siguientes veremos cómo la teoría de cuerdas sirve para explicar y confirmar la complementariedad de agujero negro, el origen de la entropía de agujero negro y el principio holográfico.

Capítulo 20

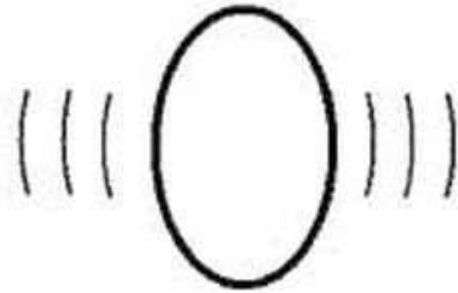
El avión de Alicia, o la última hélice visible

Para la mayoría de los físicos, especialmente los especializados en la teoría de la relatividad general, la complementariedad de agujero negro parecía demasiado descabellada para ser cierta. No es que se sintieran incómodos con la ambigüedad cuántica; la ambigüedad en la escala de Planck era totalmente aceptable. Pero la Complementariedad de agujero negro estaba proponiendo algo mucho más radical. Dependiendo del estado de movimiento del observador, un átomo podría seguir siendo un objeto microscópico minúsculo, o podría dispersarse sobre todo el horizonte de un enorme agujero negro. Este grado de ambigüedad era demasiado duro de tragar. Parecía extraño incluso para mí.

Cuando pensaba en ello durante las semanas que siguieron a la conferencia de Santa Bárbara en 1993, el comportamiento peculiar empezó a recordarme algo que había visto antes. Veinticuatro años antes, durante la infancia de la teoría de cuerdas, yo me había llegado a sentir molesto por una propiedad perturbadora de los minúsculos objetos de tipo cuerda —yo les llamaba entonces «gomas elásticas»— que representaban partículas elementales.

Según la teoría de cuerdas, cualquier cosa en el mundo está hecha de cuerdas de energía, elásticas y unidimensionales, que pueden ser estiradas, pulsadas y enrolladas. Empecemos considerando una partícula como una goma elástica en miniatura no mucho mayor que la longitud de Planck. Una goma elástica, si se pulsa, empezará

a contonearse y vibrar, y si no hubiera fricción entre las piezas de caucho, el contoneo y la vibración continuarían para siempre.



Añadir energía a una cuerda la hace oscilar aún más violentamente, a veces hasta el punto de que se parece a una enorme masa de gelatina que fluctúa incontroladamente. Estas oscilaciones son *fluctuaciones térmicas*, que añaden energía real a la cuerda.



Pero no olvidemos las agitaciones cuánticas. Incluso si se elimina toda la energía de un sistema, dejándolo en su estado fundamental,

las agitaciones nunca desaparecen por completo. Este movimiento complicado de una partícula elemental es sutil, pero puedo darle una idea valiéndome de una analogía. Primero, sin embargo, quiero hablarle de silbatos de perros y hélices de aviones.

Por alguna razón, los perros son sensibles a sonidos de alta frecuencia que no son detectados por los seres humanos. Quizá el tímpano de un perro sea más ligero y capaz de percibir vibraciones de energía más altas. Así, si usted necesita llamar a su perro pero no quiere molestar a los vecinos, utiliza un silbato para perros. Un silbato para perros produce un sonido de una frecuencia tan alta que el sistema auditivo humano no responde a ella.

Imaginemos ahora a Alicia que se hunde en un agujero negro y sopla su silbato para perros para hacer una señal a Rex, a quien ha dejado al cuidado de Bernardo⁸⁶. Al principio Bernardo no oye nada; la frecuencia es demasiado alta para sus oídos. Pero recordemos lo que sucede con las señales que se originan cerca del horizonte. Según Bernardo, Alicia y todas sus funciones parecen frenarse. Eso incluye el sonido de alta frecuencia de su silbato. Aunque el sonido está inicialmente fuera del rango de audición de Bernardo, a medida que Alicia se acerca al horizonte, el silbato se hace audible para él. Supongamos que el silbato para perros de Alicia tiene toda una variedad de altas frecuencias, algunas incluso fuera del rango de audición de Rex. ¿Qué oírá Bernardo? Al principio nada, pero pronto empezará a oír la frecuencia más baja emitida por el silbato.

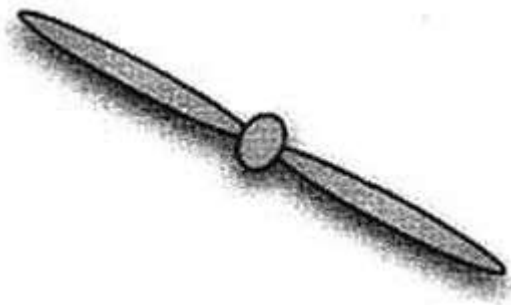
⁸⁶ Estrictamente hablando, el sonido no puede propagarse en el espacio vacío. Usted puede volver a la analogía del agujero de drenaje, o puede sustituir el silbato de Alicia por una linterna ultravioleta.

Conforme pasa el tiempo, será audible el siguiente tono más alto. Con el tiempo, Bernardo oirá toda la sinfonía de sonidos que produce el silbato de Alicia. Tenga en mente esta historia mientras le hablo de hélices de aviones.

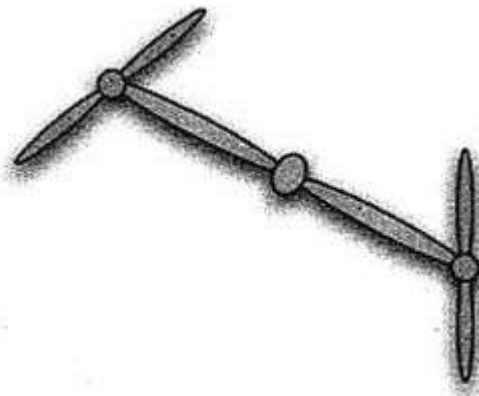
Muy probablemente usted ha tenido oportunidad de observar una hélice de avión cuando se frena hasta detenerse. Al principio las palas son invisibles, y todo lo que usted ve es el eje central.



Pero cuando la hélice se frena y la frecuencia desciende por debajo de treinta revoluciones por segundo, las palas se hacen visibles y el conjunto se hace más grande.



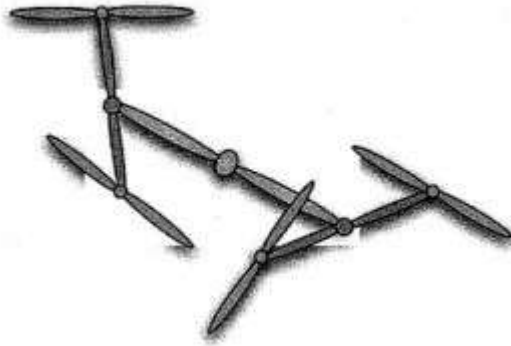
Imaginemos ahora un avión con un nuevo tipo de hélice «compuesta». Lo llamaremos el «avión de Alicia». En la punta de cada pala de la hélice hay otro eje al que hay unidas palas adicionales de «segundo nivel». Las palas de segundo nivel giran mucho más rápido que las palas originales, digamos que diez veces más rápidas.



Cuando llegan a verse las palas de primer nivel, las palas de segundo nivel son aún invisibles. Cuando la hélice se frena todavía más, se hacen visibles las palas de segundo nivel. De nuevo, la estructura parece crecer. Hay un tercer nivel de palas acopladas a los extremos de las palas de segundo nivel. Dichas palas giran diez veces más rápido que las palas de segundo nivel. Se necesitará aún más frenado, pero con el tiempo la hélice compuesta parecerá dispersarse sobre un área cada vez mayor.

El «avión de Alicia» no se queda en tres niveles. Su hélice se prolonga indefinidamente, y a medida que se frena, se hace visible una parte cada vez mayor. Cada vez más grande, finalmente alcanza

proporciones enormes. Pero a menos que la hélice llegue a pararse por completo, todo lo que se puede ver es un número finito de niveles.



El siguiente paso, si no lo ha adivinado ya, es que Alicia dirija su avión directamente a un agujero negro. ¿Qué vería Bernardo? Probablemente usted mismo pueda deducirlo a partir de todo lo que le he contado, especialmente sobre agujeros negros y máquinas del tiempo. Con el paso del tiempo, parecería que la hélice se frena. En cierto momento aparecería la primera pala; luego el conjunto se iría haciendo cada vez más visible y mostraría más niveles, y finalmente crecería hasta cubrir todo el horizonte.

Eso es lo que vería Bernardo. Pero ¿qué vería Alicia que se mueve detrás de la hélice? Nada muy inusual. Si estuviera soplando su silbato para perros, el sonido seguiría siendo inaudible para ella. Si mirase la hélice, ésta continuaría girando demasiado rápido para que sus ojos o su cámara lo detectaran. Ella vería lo que usted y yo vemos cuando miramos una hélice a alta velocidad: el eje y nada más.

Usted puede pensar que hay algo equivocado en esta imagen. Quizá Alicia no sea capaz de ver las hélices que giran rápidamente, pero decir que son indetectables parece demasiado fuerte. Después de todo, fácilmente podrían rebanarla en pedazos. De hecho, eso es cierto para las hélices reales, pero el movimiento que estoy describiendo es más sutil. Recordemos que en los capítulos 4 y 9 expliqué que hay dos tipos de agitaciones en la Naturaleza: agitaciones cuánticas y agitaciones térmicas. Las agitaciones térmicas son peligrosas; pueden transferir dolorosamente energía a sus terminaciones nerviosas o cocer un filete de carne. Pueden desgarrar moléculas o átomos si la temperatura es suficientemente alta. Pero por mucho tiempo que deje usted su filete en el frío vacío del espacio, las fluctuaciones cuánticas del campo electromagnético lo dejarán completamente crudo.

En los años setenta del siglo pasado, teóricos de agujeros negros tales como Bekenstein, Hawking y, especialmente, William Unruh, demostraron que cerca del horizonte de un agujero negro las agitaciones térmicas y cuánticas se mezclan de una manera singular. Agitaciones que parecen ser inocentes fluctuaciones cuánticas para alguien que atraviesa el horizonte de un agujero negro se convierten en fluctuaciones térmicas extraordinariamente peligrosas para algo que permanezca suspendido fuera del agujero negro. Es como si el movimiento invisible de las hélices de Alicia (invisibles para Alicia) fueran agitaciones cuánticas, pero se convierten en agitaciones térmicas cuando se frenan en el sistema de referencia de Bernardo. El movimiento cuántico benigno que

Alicia deja de percibir sería extremadamente peligroso para Bernardo si él se mantuviera justo por encima del horizonte.

Probablemente usted ya ha advertido la relación con la complementariedad de agujero negro. En realidad, la similitud con las cosas que he explicado en el capítulo 15 sobre átomos que caen en un agujero negro son sorprendentes. Eso era hace cinco capítulos, así que aquí va un pequeño recordatorio.

Imaginemos que mientras cae hacia el horizonte, Alicia tiene la mirada puesta en un átomo que cae cerca de ella. El átomo parece perfectamente normal, incluso cuando atraviesa el horizonte. Sus electrones siguen dando vueltas alrededor del núcleo a la velocidad usual, y no parece más grande que cualquier otro átomo, aproximadamente una milmillonésima del tamaño de esta página.

En cuanto a Benito, él ve que el átomo se frena cuando se aproxima al horizonte, y al mismo tiempo los movimientos térmicos lo rompen y lo dispersan sobre un área que se amplía cada vez más. El átomo se parece a un «avión de Alicia» en miniatura.

¿Estoy insinuando que los átomos tienen hélices que tienen hélices que tienen hélices *ad infinitum*? Sorprendentemente, eso es casi exactamente lo que quiero decir. Las partículas elementales se imaginan habitualmente como objetos muy pequeños. El eje central de la hélice compuesta de Alicia también parece pequeño, pero el conjunto total, incluidos todos los niveles de estructura, es enorme o incluso infinito. ¿Podríamos estar equivocados sobre las partículas cuando decimos que son pequeñas? ¿Qué dice la experimentación a este respecto?

Cuando se piensa en observaciones experimentales de partículas es útil imaginar cada experimento como un proceso similar a fotografiar un objeto en movimiento. La capacidad de capturar movimientos rápidos depende de la rapidez con que puede actuar la cámara para registrar la imagen. La velocidad del obturador es la medida importante de resolución temporal. Obviamente, la velocidad del obturador desempeñaría un papel central al fotografiar la hélice compuesta de Alicia. Una cámara lenta captaría sólo el eje principal. Una cámara más rápida captaría la estructura adicional de alta frecuencia. Pero incluso la cámara más rápida sólo podría captar parte de la estructura compuesta de la hélice... a menos que captara al avión cuando caía en el agujero negro.

La velocidad del obturador en un experimento de física de partículas está relacionada con la energía de las partículas que colisionan: cuanto mayor es la energía, más rápido es el obturador. Por desgracia para nosotros, la velocidad del obturador está seriamente limitada por la capacidad de acelerar partículas hasta una energía muy alta. Idealmente, nos gustaría resolver movimientos que tienen lugar en períodos de tiempo menores que el tiempo de Planck. Esto requeriría acelerar partículas a energías por encima de la masa de Planck; algo en teoría fácil, pero imposible en la práctica.

Éste es un buen momento para hacer una pausa y considerar las extraordinarias dificultades a que se enfrenta la física moderna. A lo largo del siglo XX, los físicos han utilizado aceleradores cada vez más grandes para observar los objetos más pequeños y los movimientos más rápidos. Los primeros aceleradores eran simples

montajes de mesa que podían sondear la estructura de los átomos. Los núcleos requirieron máquinas más grandes, algunas tan grandes como edificios. Los quarks sólo se descubrieron cuando los aceleradores alcanzaron longitudes kilométricas. El mayor acelerador actual, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), en Ginebra, Suiza, tiene casi treinta kilómetros de circunferencia, pero todavía es demasiado pequeño para acelerar partículas hasta la masa de Planck. ¿Cuánto más grande tendría que ser un acelerador para resolver movimientos de frecuencia planckiana? La respuesta es descorazonadora; para acelerar una partícula hasta la masa de Planck, un acelerador tendría que ser al menos tan grande como nuestra galaxia.

Para ponerlo en términos simples, mirar movimientos planckianos con tecnología moderna es comparable a fotografiar una hélice de avión rotatoria con una cámara cuyo obturador permanece abierto durante diez millones de años. No es sorprendente que las partículas elementales parezcan ser muy pequeñas, porque todo lo que podemos ver es el eje.

Si los experimentos no pueden decirnos si las partículas tienen estructuras subyacentes, que vibran con alta frecuencia, tenemos que apelar a las mejores teorías. En la segunda mitad del siglo XX, la herramienta matemática más potente para el estudio de las partículas elementales fue la teoría cuántica de campos. La teoría cuántica de campos es una disciplina fascinante que empieza postulando que las partículas son tan pequeñas que pueden considerarse como meros puntos de espacio. Pero esa imagen

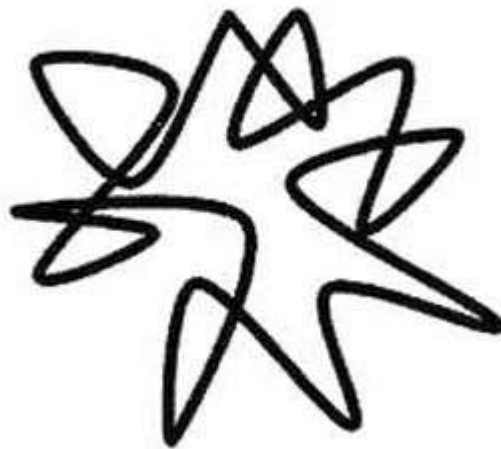
pronto se viene abajo. Las partículas se rodean rápidamente de más partículas que van y vienen a una tremenda velocidad. Estas nuevas partículas que van y vienen se rodean a su vez de partículas que aparecen y desaparecen aún más rápidamente. Fotografíar con velocidades de obturador aún más rápidas revelaría cada vez más estructura dentro de las partículas; otras partículas que oscilan cada vez más rápido y que nacen y desaparecen. Una cámara lenta ve una molécula como un borrón uniforme. Sólo se revela como una colección de átomos si la velocidad del obturador es suficientemente rápida para captar los movimientos atómicos. El borrón de carga eléctrica alrededor de un núcleo requiere un experimento aún más rápido para resolverse en electrones. Los núcleos se resuelven en protones y neutrones, que se convierten en quarks, y así continúa. Pero estas fotografías cada vez más rápidas no mostrarían la característica principal que estamos buscando: una estructura en expansión que llena cada vez más espacio. En su lugar, mostraría partículas cada vez más pequeñas ordenadas en una jerarquía que recuerda a una matrioska rusa (unas muñecas dentro de otras). Esto no es lo que necesitamos para explicar cómo se comportan las partículas cerca de los horizontes.

La teoría de cuerdas es mucho más prometedora. Lo que dice es tan contraintuitivo que durante muchos años los físicos no sabían qué hacer con ella. Las partículas elementales descritas por la teoría de cuerdas —los supuestamente minúsculos lazos de cuerda— son



simplemente como hélices compuestas. Empecemos con un obturador lento. Una partícula elemental parece casi un punto; la consideraremos como el eje. Aceleremos ahora el obturador hasta que quede abierto un tiempo un poco mayor que el tiempo de Planck. La imagen empieza a mostrar que la partícula es una cuerda.

Aceleremos el obturador aún más. Lo que uno ve es que cada trozo de cuerda está fluctuando y vibrando, de modo que la nueva imagen parece más enmarañada y dispersa.



Pero ese no es el final; el proceso se repite. Cada pequeño lazo, cada trozo de cuerda, se resuelve en lazos y tirabuzones que fluctúan más rápidamente.



¿Qué ve Bernardo cuando observa una partícula tipo cuerda que cae hacia el horizonte? Al principio, el movimiento oscilante es demasiado rápido para que se pueda resolver, y todo lo que ve es el minúsculo centro similar a un eje. Pero pronto empieza a afirmarse la naturaleza peculiar del tiempo cerca del horizonte, y el movimiento de la cuerda parece frenarse. Poco a poco ve una parte cada vez mayor de la estructura oscilante, de la misma manera que veía la hélice compuesta de Alicia. Conforme pasa el tiempo saltan a la vista oscilaciones aún más rápidas, y la cuerda parece crecer y dispersarse sobre todo el horizonte del agujero negro.

Pero ¿qué pasa si caemos junto con la partícula? Entonces el tiempo se comporta de forma normal. Las fluctuaciones de alta frecuencia siguen siendo de alta frecuencia, muy lejos del rango de nuestra cámara lenta. Estar cerca del horizonte no nos da ninguna ventaja. Como en el caso del «avión de Alicia», sólo vemos el minúsculo eje.

La teoría de cuerdas y la teoría cuántica de campos comparten la propiedad de que las cosas parecen cambiar cuando aumenta la velocidad del obturador. Pero en la teoría cuántica de campos los objetos no crecen. En su lugar, parecen descomponerse en objetos cada vez más pequeños —muñecas rusas cada vez más pequeñas. Pero cuando los constituyentes se hacen tan pequeños como la longitud de Planck, emerge una pauta completamente nueva: la pauta del «avión de Alicia».

En la alegoría de Russell Hoban *El ratón y su hijo*, hay una divertida metáfora (inintencionada) sobre cómo trabaja la teoría cuántica de campos. En algún momento durante su aventura de pesadilla, los ratones mecánicos —padre e hijo— descubren una lata fascinante de *Bonzo Dog Food*. En la etiqueta de la lata hay una imagen de un perro que sostiene una lata de *Bonzo Dog Food*, cuya etiqueta muestra un perro que sostiene una lata de *Bonzo Dog Food*, cuya etiqueta... Los ratones se esfuerzan en mirar detalles cada vez más profundos, en una búsqueda frustrante para ver «el último perro visible», pero nunca están completamente seguros de que lo hayan visto.

Cosas dentro de cosas dentro de cosas... esa es la historia de la teoría cuántica de campos. A diferencia de la etiqueta Bonzo, sin embargo, las cosas se mueven, y cuanto más pequeñas son, más rápidas se mueven. Así que para verlas se necesita un microscopio más potente y una cámara cada vez más rápida. Pero notemos una cosa: ni la molécula resuelta ni la lata de *Bonzo Dog Food* parece hacerse más grande cuanto más estructura se revela.

La teoría de cuerdas es diferente y funciona de forma más parecida al «avión de Alicia». A medida que las cosas se frenan, saltan a la vista cada vez más «hélices» tipo cuerda. Ocupan una cantidad de espacio creciente de modo que toda la compleja estructura crece. Por supuesto, el «avión de Alicia» es una analogía, pero capta muchas de las propiedades matemáticas de la teoría de cuerdas. Las cuerdas, como cualquier otra cosa, tienen agitaciones cuánticas, pero de una forma especial. Igual que el «avión de Alicia», o la versión sinfónica de su silbato para perros, las cuerdas vibran a muchas frecuencias diferentes. La mayoría de las vibraciones son demasiado rápidas para ser detectadas, incluso con las rápidas velocidades de obturador que ofrecen los potentes aceleradores de partículas.

Cuando empecé a entender estas cosas en 1993, también empecé a entender el punto ciego de Hawking. Para la mayoría de los físicos que habían sido formados en la teoría cuántica de campos, la noción de partículas crecientes con estructuras que se agitan sin límite era muy extraña. Resulta irónico que la única otra persona que había dado con tal posibilidad era el mayor teórico cuántico de campos del mundo, mi compañero de armas Gerard 't Hooft. Aunque él presentó esta idea a su propia manera, y no en el lenguaje de la teoría de cuerdas, su trabajo también expresaba una sensación de que las cosas crecen cuando se examinan con una resolución temporal creciente. Por el contrario, la caja de trucos de Hawking incluía la etiqueta de *Bonzo Dog Food*, pero no el «avión de Alicia». Para Stephen, la teoría cuántica de campos, con sus

partículas puntuales, era el principio y el fin de la física microscópica.

Capítulo 21

Contando agujeros negros

Una mañana, cuando me disponía a desayunar, mi mujer, Anne, comentó que me había puesto la camiseta al revés: la V tejida en la tela estaba en la espalda. Ese mismo día, más tarde, cuando volví a casa después de correr un poco, ella se rio y dijo, «Ahora la llevas con el interior para fuera». Eso me hizo pensar: ¿cuántas maneras hay de llevar una camiseta? Anne dijo burlándose, «Ése es el tipo de cosas estúpidas en que siempre estáis pensando vosotros los físicos». Solamente para demostrar mi inteligencia superior, afirmé rápidamente que había 24 maneras de llevar una camiseta. Uno puede meter la cabeza por cualquiera de los cuatro agujeros. Eso deja 3 agujeros para el torso. Después de escoger una abertura para el cuello y otra para el torso, quedan dos posibilidades para el brazo izquierdo. Una vez que uno ha decidido dónde va el brazo izquierdo, sólo queda una elección para el brazo derecho. De modo que eso hace $4 \times 3 \times 2 = 24$ maneras para elegir. Pero entonces uno puede volver la camiseta del revés, lo que da otras 24, y por eso yo anuncié orgullosamente que había resuelto el problema: 48 maneras de llevar una camiseta. Anne no estaba impresionada. Respondió, «No, hay 49. Olvidaste una». Intrigado, pregunté, «¿Cuál olvidé?». Con una mirada que congelaría el infierno, ella dijo: «Puedes enrollarla,

hacer una bola con ella e ir dándole patadas...». Ya se hace usted una idea⁸⁷.

Los físicos (y más todavía los matemáticos) son muy buenos contando cosas; en particular, contando posibilidades. Contar posibilidades es clave para la comprensión de la entropía, pero en el caso de los agujeros negros, ¿qué es exactamente lo que contamos? Desde luego no es el número de maneras en que un agujero negro puede llevar una camiseta.

¿Por qué era tan importante el recuento de las posibilidades de un agujero negro? Después de todo, Hawking ya había dado la respuesta cuando calculó que la entropía es igual al área del horizonte en unidades de Planck. Pero había una enorme confusión en torno a la entropía de un agujero negro. Permítame recordarle por qué.

Stephen argumentaba que la idea general de entropía como información oculta —información que podría contarse si se conocieran los detalles— debía ser errónea cuando había agujeros negros implicados. Él no era ni mucho menos el único que lo decía. Casi todos los expertos en agujeros negros habían llegado a la misma conclusión: la entropía de un agujero negro era algo diferente, que no tenía nada que ver con el recuento de estados cuánticos.

¿Por qué Hawking y los relativistas tenían una idea tan radical? El problema era el persuasivo argumento de Stephen según el cual se podía seguir arrojando más y más información dentro de un agujero

⁸⁷ Desde que escribí esto, Anne ha descubierto al menos otras 10 maneras de llevar una camiseta.

negro —como meter un número infinito de payasos en un coche de payasos— sin que se escapara ninguna información. Si la entropía tuviera su significado habitual (es decir, el número total de bits posibles que podrían estar ocultos en un agujero negro) la cantidad de información que podría estar oculta tendría que estar limitada. Pero si en un agujero negro pudiera perderse un número indefinido de bits, eso significaría que el cálculo de la entropía del agujero negro podría no estar contando todas las posibilidades ocultas; y eso supondría que hay que dar una nueva base revolucionaria a una de las disciplinas más viejas y más fiables de la física, la termodinámica. Por lo tanto, se hacía urgente conocer si la entropía del agujero negro cuenta realmente las configuraciones posibles de un agujero negro.

En este capítulo voy a contarle cómo los teóricos de cuerdas llegaron a este recuento y cómo, al hacerlo, dieron una base mecano-cuántica firme para la entropía de Bekenstein-Hawking, una base que no dejaba lugar a la pérdida de información. Esto fue un logro importante, y un gran paso para minar la afirmación de Stephen de que un agujero negro podría tragar una cantidad de información indefinida.

Pero déjeme explicar primero un punto de vista sugerido originalmente por Gerard 't Hooft.

La conjetura de 't Hooft

Hay muchísimas partículas elementales diferentes, y creo que es justo decir que los físicos no entienden por completo lo que hace a

unas diferentes de otras. Pero sin plantear las preguntas profundas, aún podemos echar una mirada empírica a todas las partículas que o bien son conocidas por experimentos o se espera que existan sobre bases teóricas. Una manera de mostrarlas es representarlas en un eje y hacer una especie de espectro (no a escala) de partículas elementales. El eje horizontal representa la masa, y en su extremo izquierdo se encuentran los objetos más ligeros. La masa aumenta hacia la derecha. Las líneas verticales señalan partículas específicas.



En el extremo más bajo están todas las partículas familiares cuya existencia es segura. Dos de ellas no tienen masa y se mueven a la velocidad de la luz: el fotón y el gravitón. Luego vienen los varios tipos de neutrinos, el electrón, algunos quarks, el muón, algunos quarks más, el bosón W, el bosón Z, el bosón de Higgs y el leptón tau. Los nombres y los detalles no son importantes.

A masas algo mayores, hay toda una colección de partículas cuya existencia es sólo hipotética, pero que muchos físicos (yo incluido) piensan que pueden existir⁸⁸. Por razones que no nos interesan aquí, estas partículas hipotéticas se denominan *supercompañeras*.

⁸⁸ Estrictamente hablando, el sonido no puede propagarse en el espacio vacío. Usted puede volver a la analogía del agujero de drenaje, o puede sustituir el silbato de Alicia por una linterna ultravioleta.

Por encima de las supercompañeras hay un gran hueco que he indicado por signos de interrogación. No es que sepamos que hay un hueco; simplemente no tenemos ninguna razón especial para postular partículas en esta región. Además, ningún acelerador que se esté construyendo, o siquiera contemplando, será suficientemente potente para crear partículas de una masa tan grande. Por eso el hueco es *terra incognita*.

Luego, con masas mucho más allá de las supercompañeras, están las *partículas de gran unificación*. También son hipotéticas, pero hay muy buenas razones para creer que existen; en mi opinión, razones mejores incluso que para la existencia de las supercompañeras. No obstante, si se descubren, será de manera indirecta, en el mejor de los casos.

Las partículas más controvertidas en mi diagrama son las *excitaciones de cuerdas*. Según la teoría de cuerdas, éstas son los *estados excitados* muy pesados, rotatorios y vibratorios, de las partículas ordinarias. Luego, en lo más alto, tenemos la *masa de Planck*. Antes de principios de los años noventa, la mayoría de los físicos habrían esperado que la masa de Planck fuera el final del espectro de las partículas elementales. Gerard 't Hooft tenía un punto de vista diferente. Él argumentaba que había ciertamente objetos con masa mayor. La masa de Planck, aunque enorme en la escala del electrón o de la masa de un quark, es comparable a la masa de una mota de polvo. Obviamente existen cosas más pesadas: bolas de bolos, locomotoras de vapor y cestas de Navidad entre ellas. Pero entre aquellas cosas más pesadas están

especialmente las que son las más pequeñas en tamaño para una masa dada.

Tomemos un ladrillo ordinario. Su masa es de aproximadamente un kilogramo. «Sólido como un ladrillo», decimos. Pero los ladrillos, por sólidos que parezcan, son espacio casi totalmente vacío. Si se les somete a presiones enormes, pueden comprimirse hasta un tamaño mucho menor. Si la presión fuera suficientemente alta, un ladrillo podría comprimirse hasta el tamaño de una cabeza de alfiler o incluso de un virus. Y todavía seguiría siendo fundamentalmente espacio vacío.

Pero hay un límite. No quiero decir un límite práctico basado en las limitaciones de la tecnología actual. Hablo de las leyes de la Naturaleza y los principios físicos fundamentales. ¿Cuál es el diámetro mínimo que puede ocupar un objeto de un kilogramo? Una conjetura obvia es el tamaño de Planck, pero no es la respuesta correcta. El objeto puede ser comprimido hasta que se convierta en un agujero negro cuya masa es un kilogramo⁸⁹, pero no más: ese es el objeto más pequeño y más concentrado posible con una masa dada.

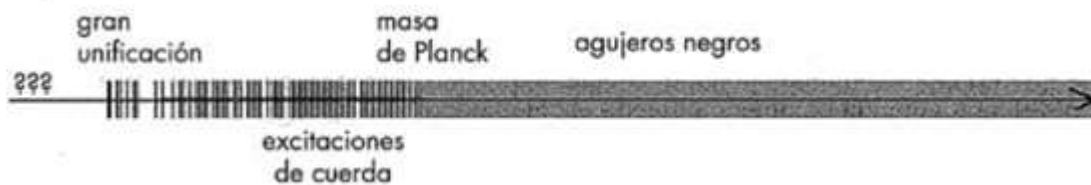
¿Cuál es el tamaño de un agujero negro de un kilogramo? La respuesta es menor de lo que usted podría estar pensando. El radio de Schwarzschild (radio del horizonte) de semejante agujero negro es de unos cien millones de longitudes de Planck. Eso puede sonar grande, pero lo cierto es que es un billón de veces más pequeño que

⁸⁹ Hay aquí un punto técnico sutil. Comprimir un ladrillo o cualquier otro objeto aumenta su energía, y puesto que $E=mc^2$, también incrementa su masa. Pero podemos compensar este incremento de varias maneras. Lo que queremos es terminar con el objeto más pequeño posible de un kilogramo de masa.

un protón. Parece ser tan pequeño como una partícula elemental, así que ¿por qué no contarle como una?

Eso es precisamente lo que hizo 't Hooft. O al menos dijo que en ningún aspecto importante difiere esencialmente de una partícula elemental. Entonces propuso la atrevida idea que sigue:

El espectro de las partículas no termina en la masa de Planck. Continúa hasta masas indefinidamente grandes en forma de agujeros negros.



T Hooft argumentó también que los agujeros negros no podían tener masas arbitrarias sino que, como sucede con las partículas ordinarias, sólo son posibles ciertas masas discretas. No obstante, por encima de la masa de Planck el espaciado entre estos valores permitidos es tan estrecho que prácticamente se convierten en un trazo continuo⁹⁰.

La transición de partículas ordinarias (o excitaciones de cuerdas) a agujeros negros no es tan desigual como nuestro en la figura. Muy

⁹⁰ ¿Por qué es así? Es por la entropía. Cuando la masa aumenta, también lo hace el horizonte; por eso aumenta también la entropía del agujero negro. Pero recuerde: entropía significa información oculta. Cuando decimos que la masa de un agujero negro es un kilogramo, realmente queremos decir aproximadamente un kilogramo. Una expresión más precisa es que la masa es un kilogramo con un cierto margen de error. Si hay muchas masas de agujero negro posibles dentro del margen de error, hemos dejado mucha información fuera de nuestra descripción. Esa información que falta es la entropía del agujero negro. Sabiendo que la entropía del agujero negro crece con la masa, 't Hooft razonó que el espectro de las masas de los agujeros negros debe convertirse en un trazo continuo muy denso.

probablemente el espectro de excitaciones de cuerdas se funde con el espectro de agujero negro sin ninguna abrupta diferencia cerca de la masa de Planck. Ésta era la conjetura de 't Hooft, y como veremos, hay una muy buena razón para creerla.

Contando cuerdas y contando agujeros negros

El «avión de Alicia» es una metáfora de cómo aparecen las cosas a los ojos del observador. Alicia, desde la cabina del piloto, no ve nada excepcional en el horizonte. Pero visto desde fuera del agujero negro, el avión parece tener cada vez más hélices que poco a poco se extienden sobre el horizonte. El «avión de Alicia» es también una metáfora de cómo trabaja la teoría de cuerdas. Conforme la cuerda cae hacia el horizonte, un observador en el exterior detectará cada vez más trozos de cuerda que se materializan y llenan el horizonte.

La entropía de los agujeros negros implica que tienen una subestructura microscópica oculta similar a las moléculas en una bañera de agua caliente. Pero por sí misma, la existencia de entropía no guarda ninguna clave para la naturaleza de los «átomos de horizonte», aunque da una cuenta aproximada de su número.

En el mundo de Alicia, los átomos de horizonte son hélices. Quizá haya realmente una teoría de la gravedad cuántica basada en hélices, pero creo que la teoría de cuerdas está mejor colocada, al menos por ahora.

La idea de que las cuerdas tienen entropía se remonta a los primeros días de la teoría de cuerdas. Los detalles son matemáticos, pero la idea general es fácil de entender. Empecemos con la cuerda

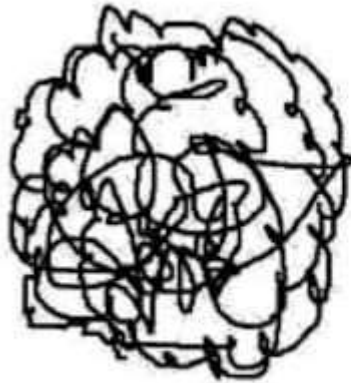
más simple, una que representa una partícula elemental de energía dada. Para concretar, supongamos que es un fotón. La presencia (o ausencia) de un fotón es un solo bit de información.

Pero hagamos ahora algo al fotón, suponiendo que es realmente una cuerda minúscula: agitémoslo o golpeémoslo con otras cuerdas, o simplemente coloquémoslo en una sartén de freír⁹¹. Igual que una pequeña goma elástica, empezará a vibrar, rotar o estirarse. Si se añade suficiente energía, empezará a parecerse a un revoltijo enorme y enredado: un ovillo que puede coger un gato. Éstas no son las agitaciones cuánticas, sino las *agitaciones térmicas*.

Un ovillo enredado se hace demasiado complicado para describir en detalle, pero aún podríamos tener alguna información bruta. La longitud total de hilo podría ser de cien metros. La madeja podría formar una bola de aproximadamente dos metros de diámetro. Una descripción de este tipo sería útil incluso si dejamos fuera los detalles. Los detalles no especificados son la información oculta que da su entropía a la bola de cuerda.

Energía y entropía. Eso suena a calor. Y, de hecho, las madejas de cuerda que constituyen las partículas elementales muy excitadas tienen una temperatura. Esto también ha sido conocido desde los primeros días de la teoría de cuerdas. En muchos aspectos, estas cuerdas enredadas y excitadas suenan mucho a agujeros negros. En 1993 me preguntaba seriamente si los agujeros negros no eran otra cosa que enormes bolas de cuerda enredadas aleatoriamente. La idea parecía intrigante, pero los detalles eran erróneos.

⁹¹ Y elevemos la temperatura hasta 10^{33} Kelvin.



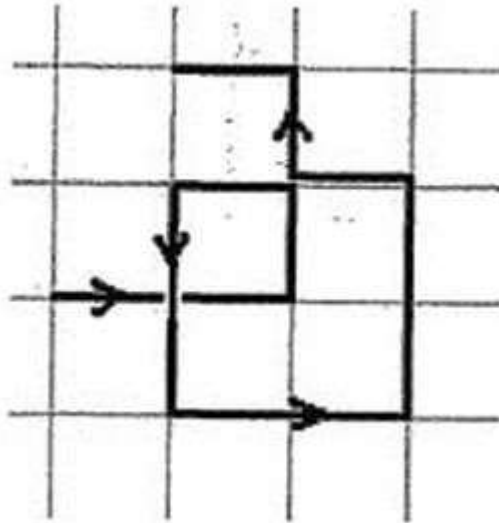
Cuerda enredada



Agujero negro

Por ejemplo, la masa (o energía) de una cuerda es proporcional a su longitud. Si un metro de hilo tiene una masa de 1 gramo, entonces 100 metros de hilo tienen una masa de 100 gramos, y 1000 metros de hilo tienen una masa de 1000 gramos.

Pero la entropía de una cuerda es también proporcional a su longitud. Imaginemos que nos movemos a lo largo de la cuerda a medida que da vueltas y se retuerce. Cada giro son unos pocos bits de información. Podemos dar una imagen simplificada de una cuerda representándola como una serie de eslabones rígidos en un retículo. Cada eslabón es horizontal o vertical.



Empezamos con un solo eslabón; puede apuntar hacia arriba, abajo, a la izquierda o a la derecha. Hay cuatro posibilidades. Eso es equivalente a dos bits de información. Añadamos ahora un eslabón. Puede seguir en la misma dirección, hacer un giro de noventa grados (a izquierda o derecha), o hacer un giro en U. Eso son dos bits más. Esto significa que la información oculta es proporcional a la longitud total de la cuerda.

Si tanto la masa como la energía de una cuerda enredada son proporcionales a su longitud, entonces no hacen falta matemáticas sofisticadas para ver que la entropía debe ser proporcional a la masa:

$$\text{entropía} \propto \text{masa}$$

(la notación matemática para proporcionalidad es \propto).

Sabemos que la entropía de un agujero negro ordinario también crece con su masa. Pero resulta que la relación concreta entropía \propto masa *no* es la relación correcta para agujeros negros. Para ver por qué, sigamos simplemente la cadena de proporcionalidades: la entropía es proporcional al área del horizonte; el área es proporcional al cuadrado del radio de Schwarzschild; el radio de Schwarzschild es proporcional a la masa. Juntemos todo y veremos que la entropía es proporcional no a la masa sino al cuadrado de la masa de un agujero negro.

$$\text{entropía} \propto \text{masa}^2.$$

Si la teoría de cuerdas es correcta, todo está hecho de cuerdas. Todo significa *todo*, y eso debería incluir los agujeros negros. Esto era desagradable para mí, y una fuente de frustración, en el verano de 1993.

De hecho, estaba cometiendo una estupidez. Estaba pasando por alto algo obvio, pero no se me ocurrió hasta septiembre, cuando estuve de visita en Nueva Jersey durante un mes. Dos de los centros más importantes de física teórica, la Universidad de Rutgers y la Universidad de Princeton, están en Nueva Jersey, a unos treinta y cinco kilómetros uno del otro. Yo tenía programada una conferencia en cada institución, ambas con el título «Cómo puede explicar la teoría de cuerdas la entropía de los agujeros negros». Cuando concerté inicialmente las visitas, yo estaba en un limbo,

confiando en que descubriría lo que estaba mal mucho antes de que tuviera que impartir las conferencias.

No sé si soy el único físico que tiene la misma pesadilla recurrente. La he tenido con diversas variantes desde que empecé hace más de cuarenta años. En el sueño, se supone que voy a dar una conferencia importante sobre una nueva investigación, pero conforme se acerca la conferencia descubro que no tengo nada que decir. No tengo notas, y a veces ni siquiera puedo recordar el tema. La presión y el pánico se apoderan de mí. A veces incluso me encuentro delante de la audiencia en ropa interior, o incluso peor, sin mi ropa interior.

Esta vez no era un sueño. La primera de las dos conferencias iba a tener lugar en Rutgers. Conforme se aproximaba la fecha, me sentía cada vez más presionado para encontrar la historia correcta, pero seguía saliendo mal. Luego, cuando quedaban tres días, me di cuenta de mi propia estupidez. Había dejado la gravedad fuera de la historia.

La gravedad actúa atrayendo los objetos y concentrándolos. Tomemos una roca enorme, la Tierra, por ejemplo. Sin gravedad, podría estar simplemente apelmazada como sucede con cualquier roca. Pero la gravedad tiene un efecto poderoso: tira de las partes de la Tierra y comprime el núcleo, que se contrae a un tamaño menor. La fuerza atractiva de la gravedad tiene otro efecto: cambia la masa de la Tierra. La energía potencial negativa debida a la gravedad resta un poco de la masa de la Tierra. La masa real es algo menor que la suma de sus partes.

Debería detenerme aquí y explicar este hecho poco intuitivo. Recordemos por un momento al pobre Sísifo, empujando sin cesar su roca hasta la cima de la colina, sólo para ver que rueda de nuevo cuesta abajo. El ciclo de conservación de la energía de Sísifo es como sigue:

química → potencial → cinética → térmica.

Olvidemos por un momento la energía química (la miel que comía Sísifo) y empecemos el ciclo por la energía potencial de la roca en la cima de la colina. El agua en lo alto de las Cataratas del Niágara también tiene energía potencial, y en ambos casos, cuando la masa cae a una altura menor, la energía potencial disminuye. Finalmente se convierte en calor, pero imaginemos que el calor se irradia al espacio. El resultado neto es que la roca y el agua pierden energía potencial cuando pierden altura.

Exactamente lo mismo sucede con el material que constituye la Tierra cuando la gravedad lo comprime y lo acerca más al centro de la Tierra: pierde energía potencial. La energía potencial perdida se manifiesta como calor, que finalmente es irradiado al espacio. Resultado: la Tierra experimenta una pérdida neta de energía, y por lo tanto una pérdida neta de masa.

Esto me hizo sospechar que la masa de una cuerda larga y enredada también podría disminuir debido a la gravedad y no ser proporcional a su longitud, una vez que se incluía adecuadamente el efecto de la gravedad. Éste es el experimento mental que imaginé.

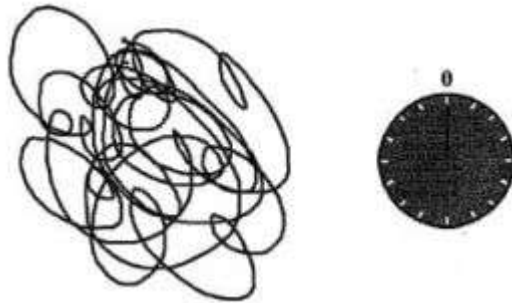
Supongamos que hubiera un botón que se pudiera girar poco a poco para aumentar y disminuir la intensidad de la gravedad. Giremos el botón en un sentido para disminuir la gravedad, y la Tierra se expandiría un poco y se haría un poco más pesada. Giremos el botón en el otro sentido para aumentar la gravedad, y la Tierra se contraería y se haría un poco más ligera. Giremos más, y la gravedad se haría aún más intensa. Finalmente, se haría tan intensa que la Tierra colapsaría y se convertiría en un agujero negro. Y lo que es más importante, la masa del agujero negro sería bastante menor que la masa original de la Tierra.

La bola de cuerda gigante que yo estaba imaginando haría lo mismo. Yo había olvidado girar el botón de la gravedad cuando estaba pensando en la relación entre bolas de cuerda y agujeros negros. De modo que una noche, sin ninguna otra cosa que hacer —recuerde, estaba en el centro de Nueva Jersey— imaginé que giraba el botón de la gravedad. En mi imaginación pude ver una bola de cuerda tirando de sí misma hasta formar una esfera rígida y contraída. Pero lo que es más importante, comprendí que la nueva y más pequeña bola de cuerda también tendría una masa mucho más pequeña que la de partida.

Había otra cuestión. Si cambiaban el tamaño y la masa de la bola de cuerda, ¿cambiaría también su entropía? Felizmente, la entropía es precisamente lo que no cambia cuando uno gira los botones lentamente. Éste es quizá el hecho más básico sobre la entropía: si uno cambia un sistema lentamente, la energía puede cambiar (normalmente lo hace), pero la entropía sigue siendo exactamente la

misma que era. Este fundamento de la mecánica clásica y de la mecánica cuántica se denomina el *teorema adiabático*.

Rehagamos el experimento mental, reemplazando la Tierra por un gran ovillo de cuerda. Empecemos con el botón de la gravedad puesto a cero.



Sin gravedad, la cuerda no se parece a un agujero negro, pero tiene entropía y masa. A continuación, giremos lentamente el botón de la gravedad. Las partes de la cuerda empiezan a atraerse mutuamente, y la bola de cuerda se comprime.



Sigamos girando el botón hasta que la cuerda se haga tan compacta que forma un agujero negro.



La masa y el tamaño se han contraído, pero —y éste es el punto importante— la entropía permanece invariable. ¿Qué sucede si giramos el botón hasta llevarlo de nuevo a cero? El agujero negro empieza a hincharse y con el tiempo se convierte de nuevo en una gran bola de cuerda. Si giramos lentamente el botón en un sentido y en otro, el objeto alterna entre un ovillo de cuerda muy suelto y un agujero negro firmemente comprimido. Pero mientras giremos el botón lentamente, la entropía sigue siendo la misma.

En un momento, ¡ajá!, comprendí que el problema con la imagen de bola-de-cuerda de un agujero negro no era que la entropía resultase errónea. Era que la masa debía ser corregida para dar cuenta de los efectos de la gravedad. Cuando hice el cálculo en una simple hoja de papel, todo encajaba. A medida que la bola de cuerda se contraía y se transformaba en un agujero negro, la masa cambiaba exactamente de la forma correcta. Al final, la entropía y la masa estaban en la relación correcta, entropía \propto masa².

Pero el cálculo estaba frustrantemente incompleto. Recordemos que el signo \propto significa «proporcional a», y no «igual a». ¿Era la entropía exactamente igual al cuadrado de la masa? ¿O era el doble de eso?

La imagen del horizonte del agujero negro que estaba emergiendo era la de un ovillo de cuerda aplanado en el horizonte por la

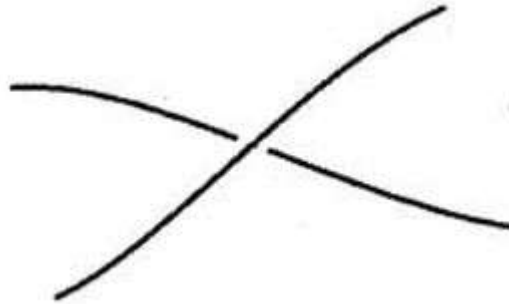
gravedad. Pero las mismas fluctuaciones cuánticas que Feynman y yo habíamos imaginado en el West End Café en 1972 provocarían que algunas partes de la cuerda sobresalieran, y estos trozos serían los misteriosos átomos de horizonte. Dicho en términos generales, alguien fuera del agujero negro detectaría trozos de cuerda, cada uno con dos extremos firmemente unidos al horizonte. En el lenguaje de la teoría de cuerdas, los átomos de horizonte son cuerdas abiertas (cuerdas con extremos) unidas a un tipo de membrana. De hecho, estos trozos de cuerda podrían desprenderse del horizonte, y eso explicaría cómo un agujero negro irradia y se evapora.



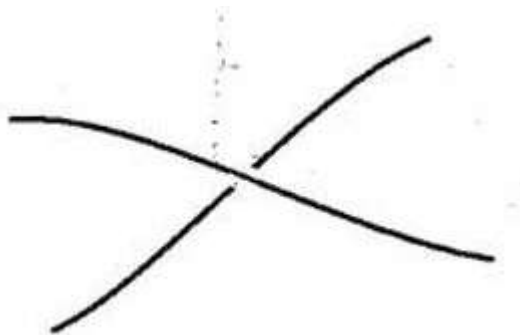
Parece que John Wheeler estaba equivocado: los agujeros negros están cubiertos de pelo. La pesadilla había acabado, y ahora yo tenía una conferencia que dar.

Cuando las cuerdas se cruzan

Las cuerdas fundamentales pueden cruzarse. La siguiente figura muestra un ejemplo. Piense que la cuerda más cercana se aleja de usted y la más alejada se acerca hacia usted. En algún momento se tocan, y si fueran cuerdas ordinarias se quedarían pegadas.

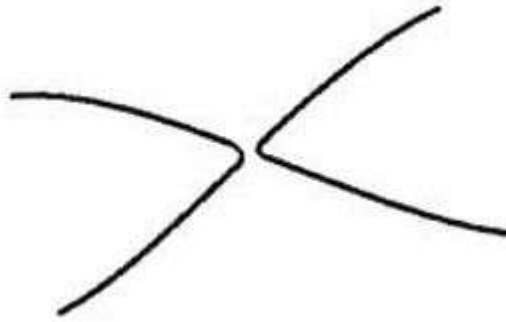


Pero las reglas matemáticas de la teoría de cuerdas les permiten cruzarse y terminar como en la imagen siguiente.



Para hacer esto con cuerdas reales, habría que cortar una de ellas y luego reconectarla en el otro lado.

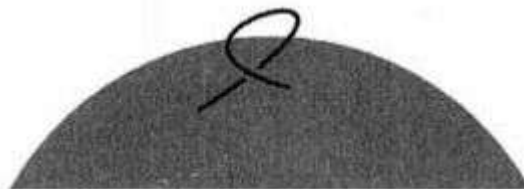
Pero puede suceder algo más cuando las cuerdas se tocan. En lugar de atravesarse, pueden reordenarse y salir con este aspecto.



Para hacer eso con cuerdas normales, habría que cortar las dos y luego reconectarlas de una nueva manera.

¿Cuál de las dos cosas sucede cuando se cruzan las cuerdas? La respuesta es a veces una y a veces la otra. Las cuerdas fundamentales son objetos cuánticos, y en mecánica cuántica nada es seguro; todo es posible, pero con probabilidades definidas. Por ejemplo, las cuerdas podrían atravesarse el 90 por 100 de las veces. El 10 por 100 restante, se reordenan. La probabilidad de que se reordenen se denomina *constante de acoplamiento de cuerdas*.

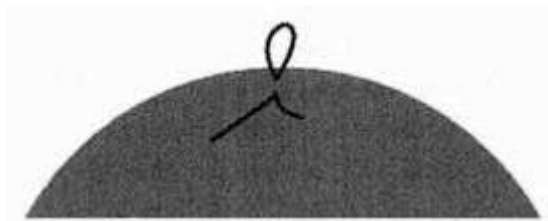
Con este conocimiento, centrémonos en un corto trozo de cuerda que sobresale del horizonte de un agujero negro. El corto segmento de cuerda está retorcido y a punto de cruzarse a sí mismo.



El 90 por 100 de las veces, se atraviesa a sí mismo y no sucede mucho más.



Pero el 10 por 100 de las veces, se reordena, y cuando lo hace, algo nuevo sucede. Un pequeño lazo de cuerda queda libre.



Ese pequeño trozo de cuerda cerrada es una partícula. Podría ser un fotón, un gravitón o cualquier otra partícula. Puesto que está fuera del agujero negro, tiene la posibilidad de escapar, y cuando lo hace, el agujero negro pierde un poco de energía. Así es como la teoría de cuerdas explica la radiación de Hawking.

Vuelta a Nueva Jersey

Los físicos de Nueva Jersey formaban un grupo tenaz. Edward Witten, el líder intelectual en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, no sólo es un gran físico sino también uno de los mejores matemáticos del mundo. Algunas personas dirían que la

conversación banal y la especulación ociosa no son su fuerte (aunque yo encuentro muy agradable su ingenio sutil y su curiosidad de amplio alcance), pero todos estarían de acuerdo en que el rigor intelectual sí lo es. No quiero decir el rigor matemático innecesario, sino más bien los argumentos claros, detallados y bien elaborados. Hablar de física con Witten puede ser a veces muy duro, pero siempre es gratificante.

En Rutgers, el discurso intelectual era también de un nivel inusualmente alto. Había seis buenos físicos teóricos, todos ellos muy respetados, especialmente por los teóricos de cuerdas, pero también por el mundo más amplio de la física. Todos eran amigos míos, pero tres de ellos lo eran particularmente. Yo había conocido a Tom Banks, Steve Shenker y Nathan («Nati») Seiberg cuando eran físicos muy jóvenes, y disfrutaba mucho de su compañía. Ambas instituciones tenían la reputación de ser lugares de los que no se podía salir con afirmaciones a medias.

Yo sabía que mis propios argumentos no estaban muy bien terminados. La complementariedad de agujero negro, el «avión de Alicia» y las cuerdas que se transforman en agujeros negros, junto con algunas crudas estimaciones, daban una imagen que parecía sostenerse. Pero las herramientas para convertir estas ideas en matemáticas rigurosas no estaban disponibles en 1993. Sin embargo, las ideas que estaba defendiendo sintonizaban con los firmes físicos de Nueva Jersey. En particular, la respuesta de Witten fue aceptar, más o menos directamente, la proposición de que el horizonte de un agujero negro está compuesto de trozos de cuerda.

Él incluso calculó cómo se evaporan las cuerdas de manera parecida a la evaporación de un agujero negro. Shenker, Seiberg, Banks y su colega Michael Douglas tenían sugerencias muy útiles para hacer las ideas más precisas.

Entre los físicos de Nueva Jersey se encontraba también, como profesor visitante, un teórico de cuerdas a quien no conocía muy bien. Cumrun Vafa, un joven catedrático de Harvard, había venido a Estados Unidos desde Irán para estudiar física en Princeton. En 1993 era reconocido como uno de los físicos teóricos más creativos y matemáticamente, más ingeniosos del mundo. Teórico de cuerdas principalmente, también sabía mucho de agujeros negros, y estaba entre la audiencia en Rutgers cuando yo expliqué cómo la entropía de los agujeros negros podía tener su origen en la naturaleza de cuerdas del horizonte. La conversación que mantuvimos después fue decisiva.

Agujeros negros extremos

En la época de mis conferencias se entendía que si un electrón era arrojado en un agujero negro, el agujero negro se cargaría eléctricamente. La carga eléctrica, que rápidamente se dispersa por el horizonte, provocaría una repulsión que hincharía un poco el horizonte.

Pero no había razón para detenerse en un solo electrón. El horizonte podría cargarse eléctricamente tanto como uno quisiera. Cuanto más se cargara, más se alejaría de la singularidad.

Cumrun Vafa señaló que hay un tipo muy especial de agujero negro cargado que está en perfecto equilibrio entre atracción gravitatoria y repulsión eléctrica. Tales agujeros negros se denominan *extremos*. Según Vafa, los agujeros negros extremos serían el laboratorio perfecto para poner a prueba mis ideas. Argumentaba que podrían ser la clave para un cálculo más exacto en el que un estricto signo igual (=) reemplazaría al vago signo proporcional (\propto).

Llevemos un poco más lejos la idea de un agujero negro eléctricamente cargado. Normalmente las bolas de carga eléctrica no son estables. Puesto que los electrones se repelen mutuamente (recuerde la regla; cargas iguales se repelen; cargas opuestas se atraen), si se forma una nube de carga, será desgarrada al instante por la repulsión eléctrica. Pero la gravedad puede neutralizar la repulsión eléctrica si la bola de carga es suficientemente masiva. Puesto que todas las cosas en el universo se atraen gravitatoriamente, habrá una competición entre la gravedad y la repulsión eléctrica: la gravedad junta las cargas y la fuerza eléctrica las separa. Un agujero negro cargado es un tira y afloja.

Si la bola de carga es muy masiva pero sólo tiene una pequeña carga eléctrica, la gravedad ganará el juego y la bola se contraerá. Si la masa es pequeña pero tiene una carga eléctrica muy grande, la repulsión eléctrica ganará, y la bola se expandirá. Hay un punto de equilibrio en que carga y masa están en las proporciones correctas. En este punto, la repulsión eléctrica y la atracción gravitatoria se cancelan mutuamente, el juego de soga-tira queda en empate. Esto es exactamente un agujero negro extremo.

Imaginemos ahora que tenemos dos botones, uno para la gravedad y otro para la fuerza eléctrica. Inicialmente, ambos botones están activados. Cuando gravedad y fuerza eléctrica están en perfecto equilibrio, tenemos un agujero negro extremo. Si reducimos la gravedad sin reducir la fuerza eléctrica, la fuerza eléctrica empezará a ganar la soga-tira. Pero si reducimos las dos de la forma correcta, se conservará el equilibrio. Cada bando se hará más débil, pero ninguno de los dos sacará ventaja.

Finalmente, si giramos los botones hasta ponerlos a cero, las fuerzas gravitatoria y eléctrica desaparecen. ¿Qué queda? Una cuerda sin fuerzas entre sus partes. A lo largo del proceso la entropía no cambia.

Pero la conclusión es que la masa tampoco cambia. La cancelación de fuerzas eléctrica y gravitatoria «no funciona», que es una manera técnica de decir que la energía queda exactamente como empezó.

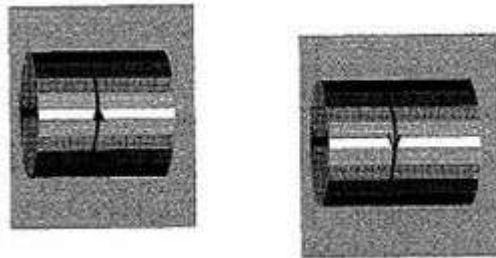
Vafa argumentaba que *si* supiéramos cómo hacer tales agujeros negros extremos en la teoría de cuerdas, podríamos estudiarlos con gran precisión cuando los botones de las fuerzas gravitatoria y eléctrica fueran conectados y desconectados. Dijo que debería ser posible, utilizando la teoría de cuerdas, calcular el factor numérico exacto que yo había sido incapaz de calcular hasta entonces. Para mezclar metáforas, calcular el factor numérico exacto se convirtió en el Santo Grial para los teóricos de cuerdas y la forma de completar la elaboración de mi idea. Pero nadie sabía cómo ensamblar el tipo adecuado de agujero negro cargado a partir de los componentes que proporciona la teoría de cuerdas.

La teoría de cuerdas es un poco como un juego de construcción, con montones de piezas diferentes que pueden encajar en pautas compatibles. Más tarde le contaré algo sobre algunas de estas «ruedas y engranajes» matemáticos, pero en 1993 todavía no se habían descubierto algunas piezas importantes que eran necesarias para construir un agujero negro extremo.

El físico indio Ashoke Sen fue el primero en tratar de componer un agujero negro extremo y poner a prueba la teoría de cuerdas de la entropía de agujero negro. En 1994 estuvo muy cerca, pero no lo suficiente para terminar la historia. Entre los físicos teóricos, Sen es tenido en muy alta estima. Tiene reputación de pensador profundo y de mago de las matemáticas. Hombre tímido, de constitución delgada, y con un fuerte acento bengalí, resulta a veces difícil de entender. Sin embargo, sus conferencias son famosas por su claridad. Con perfecta técnica pedagógica, escribe cada nuevo concepto en la pizarra. Las ideas se despliegan en una progresión inevitable que hace todo cristalino. Sus artículos científicos tienen la misma y perfecta lucidez.

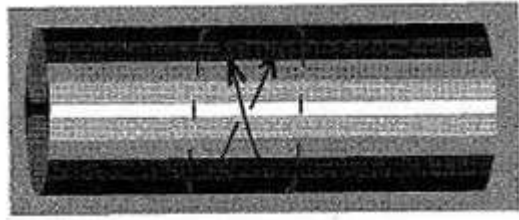
Yo no sabía que Sen estaba trabajando en agujeros negros. Pero poco después de volver a Estados Unidos de mi viaje a Cambridge, alguien —creo que fue Amanda Peet— me pasó un artículo suyo para que lo leyera. Era largo y técnico, pero en los últimos párrafos Ashoke utilizaba las ideas de la teoría de cuerdas —las que yo había descrito en Rutgers— para calcular la entropía de una nueva clase de agujeros negros extremos.

El agujero negro de Sen estaba hecho de las piezas que conocíamos en 1993: cuerdas fundamentales y las seis dimensiones extra compactas del espacio. Lo que Sen hizo luego era una extensión simple, pero muy ingeniosa, de mis propias ideas anteriores. Su innovación básica consistía en partir de una cuerda que no sólo estaba muy excitada sino que también estaba enrollada muchas veces alrededor de una dirección compacta. En el mundo simplificado de un cilindro —la versión engordada de Linealandia— una cuerda enrollada se parecería a una goma elástica enrollada alrededor de un tubo de plástico.

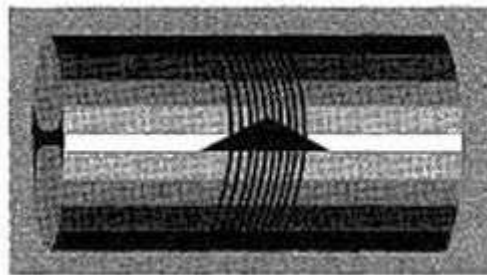


Una cuerda semejante es más pesada que una partícula ordinaria porque se necesita energía para estirla alrededor del cilindro. En la teoría de cuerdas típica, la masa de la cuerda enrollada podría ser unos pocos por ciento de la masa de Planck.

Luego Sen tomó una única cuerda y dio con ella dos vueltas alrededor del cilindro.



Un teórico de cuerdas diría que esta cuerda tiene un *número de enrollamiento 2* y es incluso más pesada que la cuerda con una vuelta. Pero ¿qué pasa si la cuerda se enrolla alrededor de la dirección compacta del espacio no una vez o dos, sino miles de millones de veces?



No hay límite de cuántas veces puede dar vueltas la cuerda alrededor de la dirección espacial compacta. Eventualmente, puede hacerse tan pesada como una estrella o incluso una galaxia. Pero el lugar que ocupa en el espacio ordinario —las dimensiones no compactas del espacio tridimensional ordinario— es pequeño. Toda esa masa confinada en un espacio tan pequeño garantiza que sea un agujero negro.

Se añadió otro truco, el ingrediente restante de la teoría de cuerdas, hacia 1993: ondulaciones que se mueven a lo largo de la

cuerda. La información estaría oculta en los detalles de las ondulaciones, como yo había argumentado años antes.

Las ondulaciones en una cuerda elástica no permanecen en reposo. Viajan a lo largo de la cuerda como ondas, unas moviéndose en sentido horario y otras en sentido antihorario. Dos ondulaciones que viajan en el mismo sentido se persiguen alrededor de la cuerda sin colisionar nunca. Sin embargo, si dos ondas se mueven en sentidos opuestos, colisionarán produciendo una mezcla complicada. Por ello, Sen decidió almacenar toda la información oculta en ondas en sentido horario que se movían al paso sin colisionar nunca.

Cuando se reunían todos los ingredientes y se conectaban los diversos botones, la cuerda de Sen no tenía otra elección que convertirse en un agujero negro. Pero en lugar de un agujero negro ordinario, el estiramiento alrededor de la dirección circular compacta llevaba a un agujero negro extremo muy especial.

Los agujeros negros extremos están cargados eléctricamente. ¿Dónde está la carga eléctrica? La respuesta se conoció hace muchos años: enrollar una cuerda alrededor de una dirección compacta le da una carga eléctrica. Cada vuelta de la cuerda le da una unidad de carga. Si la cuerda está enrollada en un sentido, está cargada positivamente; si está enrollada en sentido contrario, está cargada negativamente. La cuerda gigante y múltiplemente enrollada de Sen también podía verse como una bola de carga eléctrica mantenida por la gravedad; en otras palabras, un agujero negro cargado.

El concepto de área es un concepto geométrico, y la geometría del espacio y el tiempo está gobernada por la teoría de la relatividad general de Einstein. La única manera de saber el área del horizonte de un agujero negro es calcularla a partir de las ecuaciones de Einstein para la gravedad. Sen, que era un maestro de las ecuaciones, había resuelto fácilmente (fácilmente para él) las ecuaciones para el tipo especial de agujero negro que había fabricado y calculó al área del horizonte.

¡Un desastre! Cuando se resolvieron las ecuaciones y se calculó el área del horizonte, el resultado era cero. En otras palabras, en lugar de ser una concha grande y bonita, el horizonte se había contraído al tamaño de un simple punto del espacio. Toda la entropía almacenada en estas cuerdas serpenteantes y ondulantes estaba aparentemente concentrada en un minúsculo punto del espacio. Esto no sólo era un problema para los agujeros negros, sino que también contradecía el principio holográfico: la máxima entropía en una región de espacio es su área en unidades de Planck. Algo estaba equivocado.

Sen sabía exactamente cuál era el problema. Las ecuaciones de Einstein son *clásicas*, lo que significa que ignoran los efectos de las fluctuaciones cuánticas. Sin fluctuaciones cuánticas, el electrón en un átomo de hidrógeno caería en el núcleo y el átomo entero no sería mayor que un protón. Pero el movimiento de punto cero cuántico debido al principio de incertidumbre hace al átomo 100 000 veces más grande que el núcleo. Sen se dio cuenta de que lo mismo sucedería con el horizonte. Aunque la física clásica predecía

que se contraería a un punto, las fluctuaciones cuánticas lo expandirían a lo que he llamado un *horizonte estirado*.

Sen hizo las correcciones necesarias: una rápida estimación «en el reverso de un sobre» demostraba que la entropía y el área del horizonte estirado eran realmente proporcionales. Esto era otro triunfo para la teoría de cuerdas de la entropía de horizonte, pero como antes, la victoria era incompleta. Seguía faltando precisión; había incertidumbre en cuánto exactamente sería estirado el horizonte por las fluctuaciones cuánticas. Aunque era brillante, el trabajo de Sen seguía acabando en un vago \propto . Lo más que podía decir era que la entropía de un agujero negro era *proporcional* al área del horizonte. Estaba cerca, pero el éxito no era completo. Todavía había que poner el «clavo en el ataúd».

No había posibilidad de que este cuasicálculo convenciera a Stephen Hawking —no más que lo que habían conseguido mis argumentos. Sin embargo, el círculo se estaba cerrando. Para llevar a cabo la propuesta de Vafa y hacer un agujero negro extremo con un horizonte clásico grande, se requerían nuevas piezas del juego de construcción. Afortunadamente, las piezas necesarias estaban a punto de descubrirse en Santa Bárbara.

Las D-branas de Polchinski

Las D-branas deberían llamarse P-branas, con P de Polchinski. Pero cuando Joe descubrió sus branas, el término *P-brana* ya se utilizaba para un objeto que no guardaba ninguna relación con ellas. Así que Joe las llamó *D-branas*, por el nombre del matemático alemán del

siglo XIX Peter Lejeune Dirichlet. Dirichlet no tenía nada que ver directamente con las D-branas, pero sus estudios matemáticos de las ondas tenían alguna relevancia.

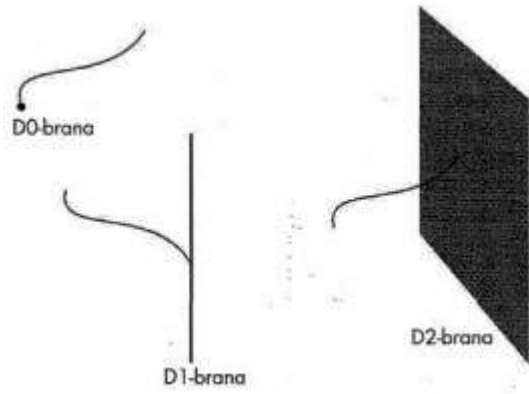
La palabra *brana* no está en el diccionario salvo en el contexto de la teoría de cuerdas. Procede del término común *membrana*, una superficie bidimensional que puede curvarse y estirarse. El descubrimiento de Polchinski en 1995 de las propiedades de las D-branas fue uno de los acontecimientos más importantes en la historia reciente de la física. Pronto iba a tener profundas repercusiones en todo, desde los agujeros negros a la física nuclear.

Las branas más simples son objetos cero-dimensionales llamados 0-branas. Una partícula o un punto del espacio es cero-dimensional: no hay ningún lugar donde moverse en un punto, de modo que partículas y 0-branas son sinónimos. Avanzando una muesca llegamos a las 1-branas, que son uno-dimensionales. Una cuerda fundamental es un caso especial de una 1-brana. Las membranas —hojas de materia bidimensionales— son 2-branas. ¿Qué hay de las 3-branas? ¿Existen tales cosas? Piense en un cubo macizo de goma que llena una región del espacio. Puede llamarlo una *3-brana espacial*.

Parece ahora que hemos agotado las direcciones. Obviamente no hay forma de encajar una 4-brana en un espacio tridimensional. Pero ¿qué pasa si el espacio tiene dimensiones compactas, seis de ellas, por ejemplo? En ese caso, una de las direcciones en una 4-brana puede extenderse en las direcciones compactas. De hecho, si

hay un total de nueve dimensiones, el espacio puede mantener cualquier tipo de brana, hasta 9-branas inclusive.

Una D-brana no es simplemente cualquier tipo de brana. Tiene una propiedad muy especial, a saber, que en ella pueden terminar cuerdas fundamentales. Tomemos el caso de una D0-brana. La D significa que es una D-brana, y el 0 significa que es cero-dimensional. De modo que una D0-brana es una partícula en la que pueden terminar cuerdas fundamentales.



Las D1-branas suelen llamarse D-cuerdas. Esto se debe a que una D1-brana, al ser unidimensional, es en sí misma un tipo de cuerda, aunque no debería confundirse con una cuerda fundamental⁹². Típicamente, las D-cuerdas son mucho más pesadas que las cuerdas fundamentales. Las D2-branas son membranas, similares a

⁹² Puede parecer extraño y algo arbitrario que haya dos tipos de cuerdas en la teoría de cuerdas. De hecho, no es arbitrario en absoluto. Hay poderosas simetrías matemáticas, conocidas como dualidades, que relacionan fuerzas fundamentales y D-cuerdas. Estas dualidades son muy similares a la dualidad que relaciona cargas eléctricas y los monopolos magnéticos cuya existencia hipotética planteó por primera vez por Paul Dirac en 1931. Habían tenido una profunda influencia en varios temas de las matemáticas puras.

láminas elásticas, pero, una vez más, con la propiedad de que en ellas pueden terminar cuerdas fundamentales.

¿Eran las D-branas sólo un capricho, un añadido arbitrario que hizo Polchinski a la teoría de cuerdas porque podía? Creo que ése pudo ser el caso en su primer trabajo exploratorio. A menudo los físicos teóricos inventan nuevos conceptos sólo para jugar con ellos y ver dónde llevan. De hecho, ése era precisamente el espíritu de la discusión en 1994, cuando Joe me mostró por primera vez la idea de las D-branas: «Mira, podemos añadir algunos nuevos objetos a la teoría de cuerdas. ¿No es divertido? Vamos a explorar sus propiedades».

Pero en algún momento en 1995, Joe se dio cuenta de que las D-branas llenaban una enorme laguna matemática en la teoría de cuerdas. Su existencia era de hecho necesaria para completar una madeja creciente de lógica y matemáticas. Y las D-branas fueron el ingrediente mágico secreto necesario para construir un mejor agujero negro extremo.

Las matemáticas de la teoría de cuerdas dan resultados

En 1996, Vafa, junto con Andy Strominger, lo consiguió. Combinando cuerdas y D-branas, ambos fueron capaces de construir un agujero negro extremo con un horizonte clásico grande e inequívoco. Puesto que un agujero negro extremo se veía como un objeto clásico grande, las agitaciones cuánticas sólo tendrían un efecto despreciable en el horizonte. Ahora no había lugar para ondulaciones. La teoría de cuerdas tenía que dar la cantidad

correcta de información oculta que implicaba la fórmula de Hawking, sin factores ambiguos de dos o π y sin signo de proporcionalidad.

Éste no era un agujero negro de la vieja escuela. El objeto que Strominger y Vafa construyeron a partir de cuerdas y D-branas parecía la pesadilla de un ingeniero, pero era la construcción más simple que tenía el gran horizonte clásico que estaban buscando. Se necesitaban todos los trucos matemáticos de la teoría de cuerdas, incluyendo el conjunto completo de dimensiones extra, cuerdas, D-branas y mucho más. Para empezar tomaron un número de D5-branas que llenaban cinco de las seis dimensiones compactas del espacio. Por encima, inmersas en las D5-branas, enrollaron un gran número de D1-branas alrededor de una de las dimensiones compactas. Y luego añadieron cuerdas unidas por sus extremos a las D-branas. Una vez más, trozos abiertos de cuerda serían los átomos de horizonte que contenían la entropía. (Si usted se ha perdido un poco, no se preocupe. Estamos en la zona de cosas que los humanos no estamos cableados para entender fácilmente).

Strominger y Vafa siguieron los mismos pasos que se habían utilizado antes. Primero, pusieron los botones a cero de modo que desaparecieran la gravedad y otras fuerzas. Sin estas fuerzas para confundir las cosas, era posible calcular exactamente cuánta entropía había almacenada en las fluctuaciones de las cuerdas abiertas. Los cálculos técnicos eran más complicados y sutiles que cualquier cosa que se había hecho antes, pero en un *tour de force* matemático, tuvieron éxito.

El siguiente paso era resolver las ecuaciones de campo de Einstein para este tipo de agujero negro extremo. Esta vez no se necesitaba ningún procedimiento de estiramiento incierto para calcular el área. Para su gran satisfacción (y la mía), Strominger y Vafa encontraron que el área del horizonte y la entropía no eran simplemente proporcionales; la información oculta en las ondulaciones de cuerda unidas a las branas coincidía exactamente con la fórmula de Hawking. Lo habían clavado.

Como suele suceder, más de un grupo de personas dieron con la nueva idea casi simultáneamente. Al mismo tiempo que Strominger y Vafa estaban haciendo su trabajo, uno de los miembros más brillantes de la nueva generación de físicos era todavía un estudiante en Princeton; el tutor de tesis de Juan Maldacena era Curt Callan (la C de CGHS). Maldacena y Callan también estaban juntando D5-branas con D1-branas y cuerdas abiertas. Pocas semanas después de Strominger y Vafa, Callan y Maldacena enviaron su propio artículo. Sus métodos eran algo diferentes, pero sus conclusiones confirmaban completamente lo que habían afirmado Strominger y Vafa.

De hecho, Callan y Maldacena fueron capaces de ir un poco más lejos que el trabajo anterior y consiguieron manejar agujeros negros ligeramente no extremos. Un agujero negro extremo es una rareza en física. Es un objeto con entropía, pero sin calor ni temperatura. En la mayoría de los sistemas mecano-cuánticos, una vez que se ha extraído toda la energía, todo queda rígidamente anclado en su lugar. Por ejemplo, si se eliminara todo el calor de un cubo de hielo,

el resultado sería un cristal perfecto sin ninguna imperfección en absoluto. Cualquier reordenación de las moléculas de agua tomaría energía y por lo tanto añadiría un poco de calor. El hielo del que se ha extraído todo el calor no tiene exceso de energía, ni temperatura, ni entropía.

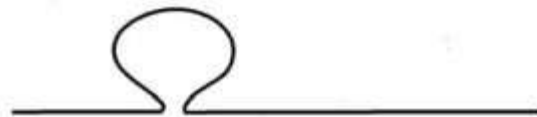
Pero hay excepciones. Algunos sistemas especiales tienen muchos estados con exactamente el mismo valor mínimo de la energía. En otras palabras, incluso después de que se haya extraído toda la energía, hay maneras de reordenar el sistema para ocultar información, y hacerlo sin añadir energía. Los físicos dicen que tales sistemas tienen *estados fundamentales degenerados*. Los sistemas con estados fundamentales degenerados tienen entropía —pueden ocultar información— incluso en el cero absoluto. Los agujeros negros extremos son ejemplos perfectos de estos sistemas inusuales. A diferencia de los agujeros negros de Schwarzschild ordinarios, están en el cero absoluto, lo que significa que no se evaporan.

Volvamos al ejemplo de Sen. En ese caso, todas las ondulaciones en la cuerda se mueven en el mismo sentido, y por consiguiente no chocan unas con otras. Pero supongamos que se añaden algunas ondulaciones que se mueven en sentido contrario. Como cabría esperar, chocan con las ondulaciones originales y crean un poco de confusión. De hecho, calientan la cuerda y aumentan su temperatura. A diferencia de los agujeros negros ordinarios, estos agujeros negros casi extremos no se evaporan por completo; se desprenden de su exceso de energía y vuelven a su estado extremo.

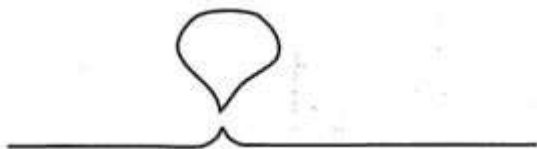
Callan y Maldacena fueron capaces de utilizar la teoría de cuerdas para calcular la velocidad a la que se evaporan los agujeros negros casi extremos. La manera en que la teoría de cuerdas explica el proceso de evaporación es fascinante. Cuando dos ondulaciones se mueven en sentidos opuestos colisionan,



forman una única ondulación más grande algo parecida a esto:



Una vez que se forma una ondulación más grande, no hay nada que le impida estrangularse, de una manera que no es muy diferente de lo que Feynman y yo habíamos hablado en 1972.



Pero Callan y Maldacena habían hecho más que hablar. Habían hecho cálculos muy detallados de la velocidad de evaporación. El hecho notable era que sus resultados coincidían exactamente con los del método de Hawking veinte años atrás, con una diferencia

importante; Maldacena y Callan habían utilizado sólo los métodos convencionales de la mecánica cuántica. Como hemos discutido en capítulos anteriores, la mecánica cuántica, aunque tiene un elemento estadístico, prohíbe la pérdida de información. Así pues, no había posibilidad de que la información pudiera perderse durante el proceso de evaporación.

Una vez más, ideas similares estaban siendo elaboradas por otros. De forma completamente independiente, dos pares de físicos indios —Sumit Das y Samir Mathur, y Gautam Mandal y Spenta Wadia— del Instituto Tata de Bombay (también hogar de Ashoke Sen) hicieron cálculos con resultados similares.

En conjunto, estos trabajos eran logros prodigiosos, y eran justamente famosos. El hecho de que la entropía de agujero negro pueda explicarse por la información almacenada en ondulaciones de cuerdas contradecía fuertemente las ideas de muchos relativistas, incluido Hawking. Stephen veía los agujeros negros como *comedores de información*, y no contenedores para almacenamiento de información recuperable. El éxito del cálculo de Strominger-Vafa mostraba cómo un único resultado matemático puede inclinar la balanza. Era el principio del fin de la pérdida de información.

La importancia del momento no pasó desapercibida. Muchas personas, incluidos mis amigos de Santa Bárbara, abandonaron el barco de repente y desertaron al otro bando. Si yo tenía alguna duda de que la guerra de los agujeros negros llegaría pronto a su fin, éstas se disiparon cuando Joe Polchinski y Gary Horowitz —

hasta entonces neutrales en la guerra— se convirtieron en mis aliados⁹³. Para mí, eso fue un acontecimiento decisivo.

La teoría de cuerdas podría ser o no la teoría correcta de la Naturaleza, pero había mostrado que los argumentos de Stephen no podían ser correctos. La cosa estaba clara pero, sorprendentemente, Stephen y muchos otros miembros de la comunidad de la relatividad general aún no lo aceptaban. Seguían cegados por los primeros argumentos de Hawking.

⁹³ Polchinski y Horowitz escribieron un informe utilizando el mismo método que yo utilicé en 1993 para medir la entropía de los agujeros negros que se da en la teoría de cuerdas (ambas extremas). En cualquier caso, los resultados eran semejantes a las fórmulas de Bekenstein-Hawking.

Capítulo 22

América del Sur gana la guerra

Muy poca gente piensa en América del Sur cuando piensan en físicos brillantes. Incluso los sudamericanos se sorprenden al saber cuántos físicos teóricos muy distinguidos proceden de Argentina, Brasil y Chile. Daniele Amati, Alberto Sirlin, Miguel Virasoro, Hector Rubinstein, Eduardo Fradkin y Claudio Teitelboim son sólo algunos de los que han tenido un impacto importante en la disciplina.

Teitelboim, quien recientemente ha cambiado su nombre por Claudio Bunster, es un extraordinario personaje, diferente de cualquier otro físico que yo haya conocido. Su familia tenía lazos muy estrechos con el presidente socialista chileno Salvador Allende y con el poeta-activista y premio Nobel Pablo Neruda. El hermano de Claudio, César Bunster, fue una figura destacada en el atentado contra el antiguo dictador fascista Augusto Pinochet el 7 de septiembre de 1986.

Claudio es un hombre alto y moreno, con un cuerpo poderoso y atlético y unos ojos penetrantes. Pese a un ligero tartamudeo, tiene el tipo de encanto y carisma que le haría un gran líder político. De hecho, fue un líder antifascista de un pequeño grupo de científicos que ayudaron a mantener viva la ciencia en Chile durante los años oscuros. No tengo duda de que su vida corrió peligro en esa época.

Claudio es un hombre de tremenda capacidad y con un toque de locura. Aunque enemigo del régimen militar en Chile, él ama todos los signos de la vida militar. Cuando vivía en Texas antes de

regresar a Chile, frecuentaba los espectáculos de armas blancas y armas de fuego, e incluso hoy suele llevar ropas militares. La primera vez que fui a visitarle a Chile me hizo sentir pánico jugando a los soldados.

Era en 1989, y todavía estaba en el poder la dictadura de Pinochet. Cuando mi mujer y yo, junto con nuestro amigo Willy Fischler, salimos del avión en Santiago, fuimos conducidos de mala manera por hombres uniformados y fuertemente armados hasta una larga fila para pasar la inspección de pasaportes. Los funcionarios del control de pasaportes eran militares, todos armados, algunos con grandes armas automáticas. Pasar el control de pasaportes no fue fácil: la larga fila apenas se movía y nosotros estábamos exhaustos.

De repente, vi una figura alta, con gafas de sol y un uniforme militar (o lo que pasaba por un uniforme militar), que atravesaba el bloqueo y se dirigía directamente hacia nosotros. Era Claudio, y estaba dando órdenes a los soldados como si fuera un general.

Cuando llegó hasta nosotros me cogió del brazo y nos escoltó con arrogancia entre los guardias, abriéndose paso con un extraordinario aire de autoridad. Cogió nuestro equipaje y rápidamente nos sacó del aeropuerto hasta su *jeep* color caqui que estaba aparcado de forma ilegal. Luego salimos del aeropuerto, a veces sobre dos ruedas, y llegamos a Santiago. Cada vez que nos cruzábamos con un grupo de soldados, Claudio saludaba. «Claudio», susurré, «¿qué estás haciendo? Vas a conseguir que nos maten». Pero nadie nos detuvo.

La última vez que estuve en Chile⁹⁴, mucho después de que el régimen de Pinochet hubiera sido reemplazado por un gobierno democrático, Claudio tenía contactos reales en el ejército, especialmente en la fuerza aérea. La ocasión fue una conferencia sobre agujeros negros que Claudio había organizado en su pequeño instituto. Él había utilizado su influencia con la fuerza aérea para llevarnos a algunos de nosotros, incluidos Hawking y yo mismo, a la base antártica chilena. Nos divertimos mucho, pero lo más extraordinario fue la forma en que nos atendieron los generales de la fuerza aérea, incluido el jefe del Estado Mayor. Un general nos servía té, otro servía *hors d'oeuvres*. Evidentemente Claudio era un hombre de considerable influencia en Chile.

Pero fue en 1989, en un recorrido en autocar por los Andes chilenos, cuando Claudio me habló por primera vez sobre ciertos agujeros negros anti De Sitter. Hoy se denominan agujeros negros BTZ, por Bañados, Teitelboim y Zanelli. Max Bañados y Jorge Zanelli eran miembros del círculo íntimo de Claudio cuando los tres hicieron un descubrimiento que iba a tener un impacto duradero en la guerra de los agujeros negros.

Ángeles y demonios

Los físicos de agujeros negros siempre están fantaseando con la idea de encerrar un agujero negro en una caja, y mantenerlo a salvo como una joya preciosa. ¿A salvo de qué? De la evaporación.

⁹⁴ Precisamente cuando este libro estaba en su fase final, visité de nuevo Chile, esta vez para participar en la fiesta del sexagésimo aniversario de Claudio Bunster. La fotografía que hay al final de este libro en la que aparecemos Stephen y yo se tomó en dicha fiesta.

Encerrarlo en una caja es como poner una tapadera en un puchero de agua. En lugar de evaporarse en el espacio, las partículas rebotarían en las paredes de la caja (o en la tapadera del puchero) y caerían de nuevo en el agujero negro (o el puchero).

Por supuesto, nadie pondrá nunca realmente un agujero negro en una caja, pero el experimento mental es interesante. Un agujero negro estable e invariable sería mucho más sencillo que uno que se evapora. Pero hay un problema: ninguna caja real puede rodear a un agujero negro indefinidamente. Como cualquier otra cosa, las cajas reales se agitan aleatoriamente, y más tarde o más temprano ocurrirá un accidente. La caja entrará en contacto con el agujero negro y ¡oops!, será succionada al interior.

Aquí es donde entra el espacio anti De Sitter (ADS). En primer lugar, pese a su nombre, el espacio anti De Sitter es realmente un continuo espacio-temporal que incluye el tiempo entre sus dimensiones. Willem de Sitter era un físico, matemático y astrónomo holandés que descubrió la solución tetradimensional a las ecuaciones de Einstein que lleva su nombre. Matemáticamente, el espacio De Sitter es un universo que se expande exponencialmente y crece de forma muy parecida a como lo hace nuestro universo⁹⁵. Durante algún tiempo se pensó que el espacio de De Sitter no era más que una curiosidad, pero en años recientes se ha hecho tremendamente importante para los cosmólogos. Es un continuo espacio-temporal curvo con curvatura positiva, lo que

⁹⁵ Recientemente, astrónomos y cosmólogos han descubierto que nuestro universo se está expandiendo a un ritmo acelerado, duplicando su tamaño cada diez mil millones de años. Se cree que esta expansión exponencial es debida a una constante cosmológica, o lo que la prensa popular llama «energía oscura».

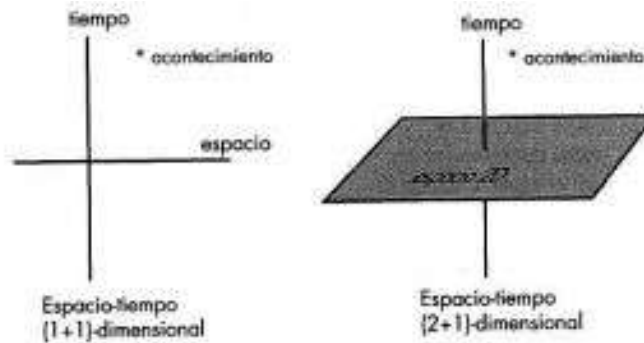
significa que la suma de los ángulos de un triángulo es algo mayor a 180 grados. Pero todo esto no nos afecta. En esta discusión es el espacio anti De Sitter, y no el espacio de De Sitter, el que nos interesa.

El espacio anti De Sitter no fue descubierto por el gemelo de antimateria de De Sitter. El «anti» indica que la curvatura del espacio es negativa, lo que significa que la suma de los ángulos de un triángulo es menor a 180 grados. Lo más interesante del ADS es que tiene muchas de las propiedades del interior de una caja esférica, pero es una caja que no puede ser tragada por un agujero negro. La razón es que la pared esférica del ADS ejerce una poderosa fuerza —una repulsión irresistible— sobre cualquier cosa que se le acerque, y eso incluye el horizonte de un agujero negro. La repulsión es tan intensa que no hay ninguna posibilidad de contacto entre la pared y el agujero negro.

En conjunto, el espacio-tiempo ordinario tiene cuatro dimensiones: tres dimensiones de espacio y una de tiempo. A veces los físicos le llaman tetradimensional, pero eso oscurece la diferencia obvia entre espacio y tiempo. Una descripción más precisa es referirse al espacio como (3+1)-dimensional.

Planilandia y Linealandia son también continuos espacio-temporales. Planilandia es un mundo con sólo dos dimensiones espaciales, pero los habitantes también experimentan una sensación de tiempo. Ellos dirían con propiedad que su mundo es (2+1)-dimensional. Los linealandeses, que sólo pueden moverse a lo largo de un único eje, pero que también pueden seguir el paso del

tiempo, viven en un espacio-tiempo $(1+1)$ -dimensional. Lo maravilloso de las $(2+1)$ y $(1+1)$ dimensiones es que podemos dibujar fácilmente imágenes de ellas para que sirvan de ayuda a nuestras intuiciones.



Por supuesto, no hay nada que impida a un físico matemático inventar mundos con cualquier número de dimensiones espaciales, pese a la incapacidad del cerebro para visualizarlos. Uno podría preguntarse si es también posible cambiar el número de dimensiones temporales. En un sentido matemático completamente abstracto, la respuesta es sí, pero no parece tener mucho sentido hacerlo desde el punto de vista de un físico. Una única dimensión temporal parece el número correcto.

El espacio anti De Sitter se da también en una variedad de dimensiones. Puede tener cualquier número de dimensiones espaciales, pero sólo una dirección temporal. El espacio ADS con el que trabajaban Bañados, Teitelboim y Zanelli era $(2+1)$ -dimensional, lo que facilita la explicación con imágenes.

Física en varias dimensiones

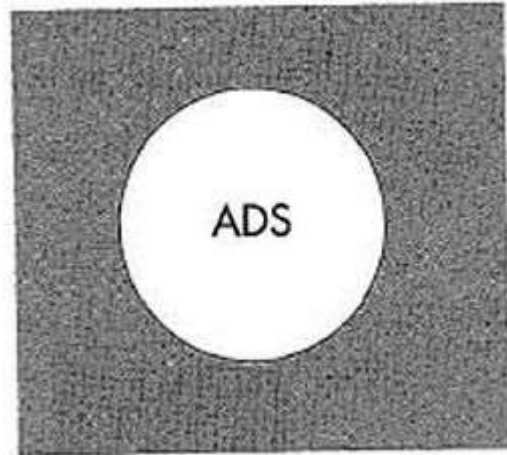
El espacio (*no* espacio-tiempo) tridimensional es una de esas cosas que parecen estar cableadas en nuestro sistema cognitivo. Nadie puede visualizar un espacio tetradimensional sin el apoyo de las matemáticas abstractas. Usted podría pensar que el espacio uni o bidimensional es más fácil de representar, y en cierto sentido lo es. Pero si usted piensa en ello por un momento se dará cuenta que cuando visualiza líneas y planos siempre los imagina inmersos en el espacio tridimensional. Eso se debe casi con seguridad al modo en que nuestros cerebros han evolucionado, y no tiene nada que ver con ninguna propiedad matemática especial de tres dimensiones⁹⁶.

La teoría cuántica de campos —la teoría de las partículas elementales— tiene tanto sentido en un mundo con menos dimensiones como lo tiene en el espacio tridimensional. Hasta donde podemos decir, las partículas elementales son perfectamente posibles en un espacio bidimensional (Planilandia) o incluso en un espacio unidimensional (Linealandia). De hecho, las ecuaciones de la teoría cuántica de campos son más sencillas cuando el número de dimensiones es menor, y mucho de lo que sabemos sobre el tema fue descubierto inicialmente estudiando la teoría cuántica de campos en tales modelos de mundo. Por eso, no era de ningún modo inusual que Bañados, Teitelboim y Zanelli estudiaran un universo en el que el número de dimensiones espaciales eran sólo dos.

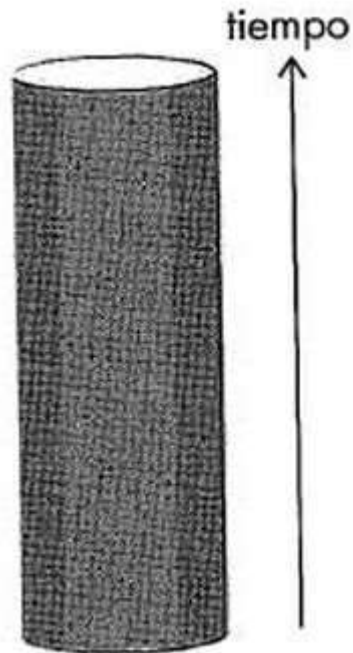
⁹⁶ ¿Podría haber sido el mundo físico uni o bidimensional (estoy hablando del espacio, no del espacio-tiempo)? No lo sé con certeza —no conocemos todos los principios que podrían determinar tales cuestiones— pero, desde un punto de vista matemático, la mecánica cuántica y la relatividad especial son tan consistentes en una y dos dimensiones como lo son en tres. No quiero decir que la vida inteligente pudiera existir en estos mundos alternativos, sino sólo que parece posible algún tipo de física.

El espacio anti De Sitter

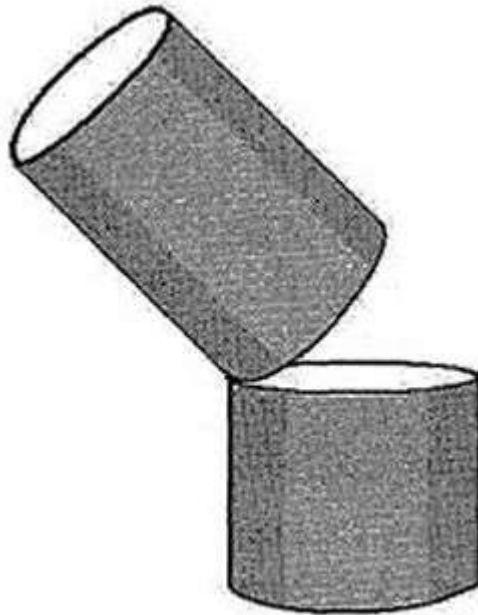
La mejor manera de explicar el ADS es la manera en que lo explicó Claudio en el recorrido turístico en Chile: con imágenes. Ignoremos el tiempo y empecemos con un espacio ordinario en el interior de una caja redonda hueca. En tres dimensiones, una caja redonda significa el interior de una esfera; en dos dimensiones es incluso más simple, el interior de un círculo.



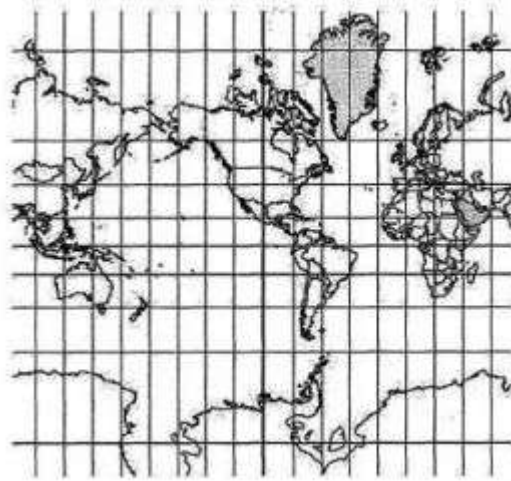
Añadamos ahora el tiempo. Representando el tiempo en el eje vertical, el continuo espacio-temporal dentro de la caja se parece al interior de un cilindro. En la figura siguiente, el ADS es el interior no sombreado del cilindro.



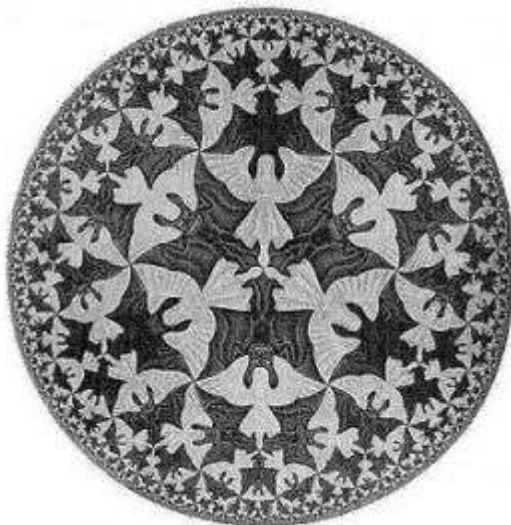
Imaginemos que seccionamos el ADS (recuerde que tiene una dimensión temporal) de la misma manera que seccionábamos un agujero negro para hacer un diagrama de inserción. Al seccionarlo queda expuesta una sección transversal espacial de la que genuinamente puede decirse que es espacio.



Examinemos un poco más de cerca la sección bidimensional. Como cabría esperar, también está curvada, en algunos aspectos como la superficie de la Tierra. Esto significa que para dibujarla en un plano (en una hoja de papel) habría que estirar y distorsionar la superficie. Es imposible dibujar un mapa de la Tierra en una hoja de papel plana sin distorsiones importantes. Las regiones cerca de los bordes norte y sur de un mapa de Mercator parecen demasiado grandes cuando se comparan con las regiones próximas al Ecuador. Groenlandia parece tan grande como África, aunque el área de África es en realidad unas quince veces mayor.



El espacio (y también el espacio-tiempo) en el ADS es curvo pero, a diferencia de la superficie de la Tierra, la curvatura es negativa. Distorsionarlo en un plano tiene un efecto anti Mercator: hace que las cosas cerca del borde parezcan demasiado pequeñas. El famoso grabado de Escher *Límite circular IV* es un «mapa» de un espacio curvado negativamente que muestra exactamente el aspecto de las secciones bidimensionales del ADS.



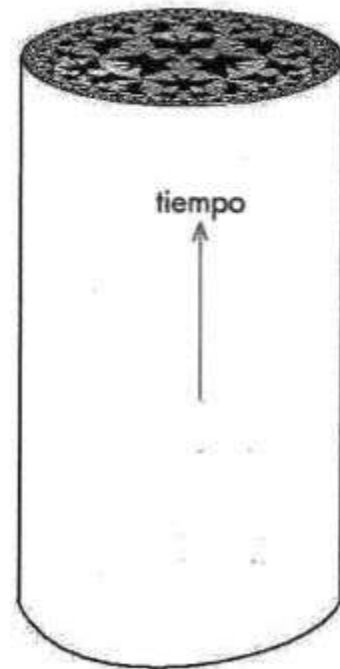
Yo encuentro el *Límite circular IV* hipnótico, cuando menos. (Me recuerda *El ratón y su hijo* y la incesante búsqueda de los personajes para ver El último perro visible. Véase el capítulo 20). Los ángeles y los demonios se prolongan indefinidamente hasta desvanecerse en un límite fractal infinito. ¿Hizo Escher un pacto con el diablo que le capacitara para dibujar un número infinito de ángeles? O, si miro con suficiente detenimiento, ¿veré el último ángel visible?

Haga usted una pausa para recablearse de modo que pueda ver todos los ángeles y demonios como si tuvieran el mismo tamaño. No es un ejercicio fácil de gimnasia mental, pero recuerde que Groenlandia es casi del mismo tamaño que la península Arábiga pese a que aparece unas ocho veces más grande en un mapa de Mercator. Al parecer, Escher estaba excepcionalmente bien cableado para este tipo de ejercicio mental, pero con práctica usted también puede aprender a hacerlo.

Añadamos ahora el tiempo y juntemos todo en una imagen de un espacio anti De Sitter. Como es usual, representamos el tiempo en un eje vertical. Cada sección horizontal representa el espacio ordinario en un instante particular. Consideremos el ADS como un número infinito de finas rebanadas de espacio —un salami cortado en rebanadas infinitamente finas— que, cuando se apilan, forman un continuo espacio-temporal.

El espacio está curvado de forma extraña en el ADS, pero no más que el tiempo. Recordemos del capítulo 3 que en la teoría de la relatividad general los relojes localizados en diferentes lugares suelen marchar a ritmos diferentes. Por ejemplo, el frenado de los relojes cerca del horizonte de un agujero negro permite que el agujero negro sea utilizado como máquina del tiempo. Los relojes en el ADS también se comportan de forma singular. Imaginemos que cada demonio de Escher lleva su propio reloj de pulsera. Si los demonios más cercanos al centro miraran a sus vecinos más distantes notarían algo muy peculiar: los relojes más lejanos marcharían a un ritmo dos veces mayor que sus propios relojes. Suponiendo que los demonios tienen un metabolismo, las funciones metabólicas de los vecinos exteriores también serían más rápidas. De hecho, toda medida del tiempo parecería estar acelerada, y cuando mirasen muy lejos, los relojes parecerían marchar aún más rápido. Cada capa sucesiva parecería ir más rápida que la anterior hasta que, cerca de la frontera, los relojes parecerían ir tan rápidos que los demonios próximos al centro verían una mancha arremolinada.

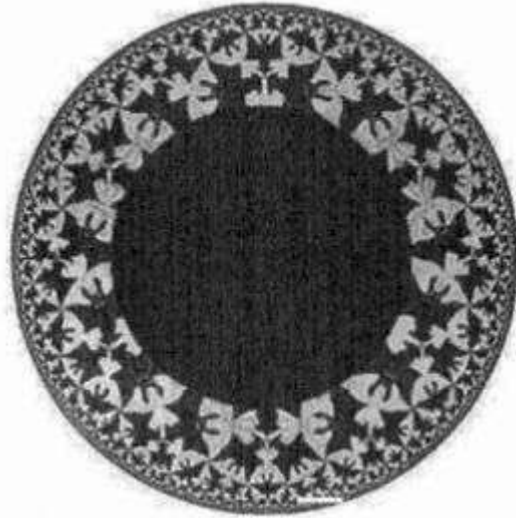
La curvatura espacio-temporal en ADS crea un campo gravitatorio que atrae los objetos hacia el centro, incluso si no hay nada allí. Una manifestación de este campo gravitatorio fantasma es que si



una masa se desplazara hacia la frontera, sería atraída de nuevo casi como si estuviera unida a un muelle. Si la soltáramos, la masa oscilaría incesantemente de un lado a otro. Un segundo efecto es exactamente la otra cara de la moneda. Una atracción hacia el centro no es diferente de un empujón desde la frontera. Ese empujón es la irresistible repulsión que impide que todo, incluidos los agujeros negros, entre en contacto con la frontera.

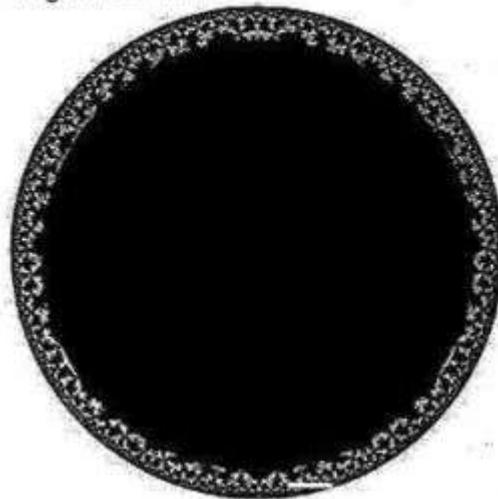
Las cajas están hechas para poner cosas en ellas, así que pongamos algunas partículas en la caja. Donde quiera que las coloquemos, serán atraídas hacia el centro. Una única partícula oscilará eternamente en torno al centro, pero si hay dos o más, pueden colisionar. La gravedad —no la gravedad fantasma del ADS, sino la atracción gravitatoria ordinaria entre partículas— puede hacer que se fusionen en un grumo. Añadir las partículas aumentaría la presión y la temperatura en el centro, y el grumo podría encenderse para formar una estrella. La adición de aún más masa llevará a un colapso cataclísmico: se formará un agujero negro —un agujero negro atrapado en una caja.

Bañados, Teitelboim y Zanelli no fueron los primeros en estudiar agujeros negros en ADS; ese honor corresponde a Don Page y Stephen Hawking. Pero BTZ descubrieron el ejemplo más sencillo, fácil de visualizar porque el espacio sólo tiene dos dimensiones. Ésta es una fotografía imaginaria de un agujero negro BTZ. El límite de la región negra es el horizonte.



Con una excepción, los agujeros negros anti De Sitter tienen todas las propiedades de los agujeros negros ordinarios. Como siempre, una singularidad muy desagradable se oculta detrás del horizonte. Añadir masa aumentará el tamaño del agujero negro, empujando al horizonte más cerca de la frontera.

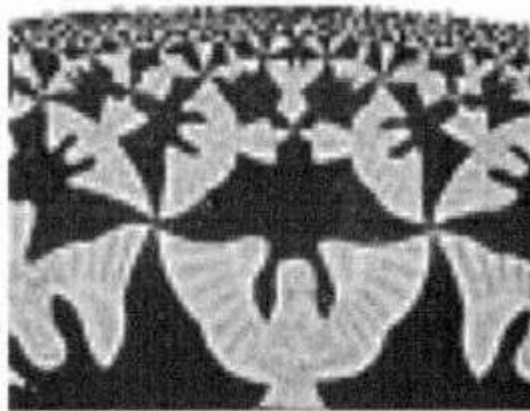
Si añades masa, el agujero negro ADS crece



Pero a diferencia de los agujeros negros ordinarios, la variedad ADS no se evapora. El horizonte es una superficie infinitamente caliente que continuamente emite fotones. Pero los fotones no tienen a dónde ir. En lugar de evaporarse en el espacio vacío, vuelven a caer en el agujero negro.

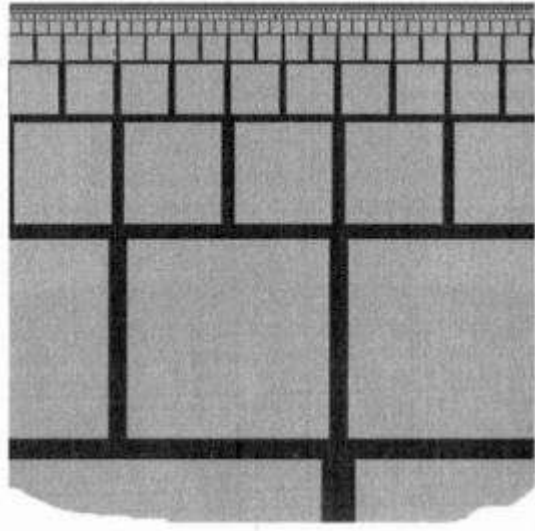
Un poco más sobre ADS

Imaginemos que nos acercamos a un punto en la frontera del *Límite circular IV* y luego lo ampliamos de modo que el borde parezca prácticamente recto.



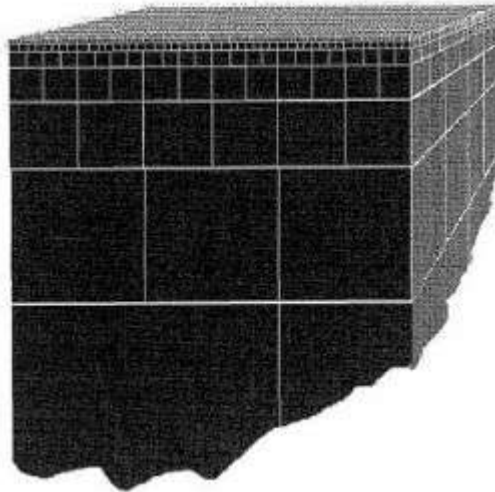
Podemos hacerlo una y otra vez, sin que nunca se agoten los ángeles y los demonios, hasta que en el límite, el borde parezca perfectamente recto e infinito. Yo no soy Escher, y no voy a tratar de reproducir sus elegantes criaturas, pero si simplifico hasta el punto de que los demonios son reemplazados por cuadrados, la imagen se convierte en una especie de retículo de cuadrados cada vez más pequeños a medida que nos acercamos a la frontera. Piense en el ADS como si fuera una pared de ladrillo infinita. A medida que

desciende por la pared, el tamaño de los ladrillos se duplica en cada nueva capa.



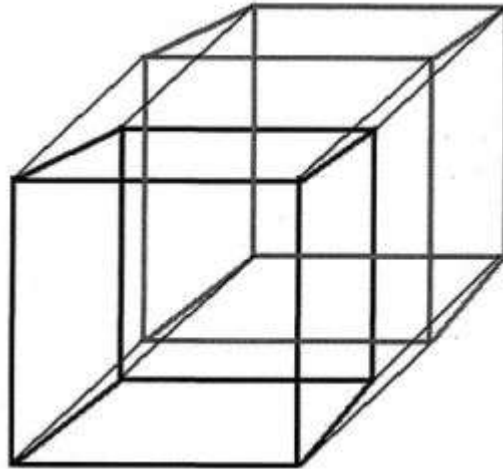
Por supuesto, no habría líneas reales en el espacio anti De Sitter, como no hay líneas de longitud y latitud en la superficie de la Tierra. Simplemente están aquí para guiar su vista e indicar cómo se distorsionan los tamaños debido a la curvatura del espacio.

El grabado de Escher y mi cruda versión del mismo representan un espacio bidimensional, pero el espacio real es tridimensional. No es difícil imaginar cómo sería el espacio si se añadiera una dimensión más (no temporal). Todo lo que tenemos que hacer es reemplazar los cuadrados por cubos macizos tridimensionales. En la figura siguiente muestro una pieza finita de una «pared de ladrillo» 3-D, pero tenga en cuenta que se prolonga indefinidamente tanto en las direcciones horizontales como en la dirección vertical.



Añadir el tiempo a la imagen es lo mismo que antes: cada cuadrado o cubo está equipado con su propio reloj. El ritmo al que marchan los relojes depende de la capa en la que están. Cada vez que pasamos a una capa más cercana al borde, los relojes se aceleran en un factor dos. Recíprocamente, cuando descendemos por la pared, los relojes se frenan.

Desde una perspectiva matemática no hay razón para detenerse en tres dimensiones espaciales. Apilando cubos tetradimensionales de tamaño variable es posible construir un espacio anti De Sitter (4+1)-dimensional, o cualquier otro número de dimensiones. Pero dibujar siquiera un único cubo 4D es complicado. Éste es un intento.



Tratar de apilarlos para dibujar una versión 4D de ADS daría como resultado un revoltijo desconcertante.

El mundo en una caja

Impedir que los agujeros negros se evaporen es una buena razón para estudiar la física en una caja, pero la idea de un mundo en una caja es mucho más interesante que eso. El objetivo real es entender el principio holográfico y hacerlo matemáticamente preciso. Así es como expliqué el principio holográfico en el capítulo 18: «El mundo tridimensional de la experiencia ordinaria —el universo lleno de galaxias, estrellas, planetas, casas, rocas y personas— es un holograma, una imagen de la realidad codificada en una superficie bidimensional lejana. Esta nueva ley de la física, conocida como el principio holográfico, afirma que todo lo que hay en el interior de una región del espacio puede describirse por bits de información restringidos a la frontera».

Parte de la imprecisión en la formulación del principio holográfico es que las cosas pueden atravesar la frontera; después de todo es sólo una superficie matemática imaginaria, sin sustancia real. La posibilidad de que los objetos puedan entrar y salir de la región hace confuso el significado de «todo lo que hay en el interior de una región del espacio puede describirse por bits de información restringidos a la frontera». Pero un mundo en una caja con paredes perfectamente impenetrables no tendría este problema. La nueva formulación sería:

Todo lo que hay en una caja con paredes perfectamente impenetrables puede describirse por bits de información almacenados en píxeles en las paredes.

En el *tour* chileno en 1989, yo no entendí por qué Claudio Teitelboim estaba tan emocionado con ese espacio anti De Sitter. Agujeros negros en una caja, ¿y qué? Necesité otros ocho años para captar la idea... ocho años y otro físico sudamericano, esta vez un argentino.

El sorprendente descubrimiento de Maldacena

Juan Maldacena es todo lo contrario de Claudio Teitelboim. No es tan extravertido sino mucho más sobrio. Para mí es imposible imaginármelo lanzado a través de la peligrosa Santiago llevando un falso uniforme militar. Pero no le falta valor como físico. En 1997 se arriesgó e hizo una afirmación extraordinariamente atrevida, una afirmación que parece casi tan alocada como mi salvaje viaje en *jeep*

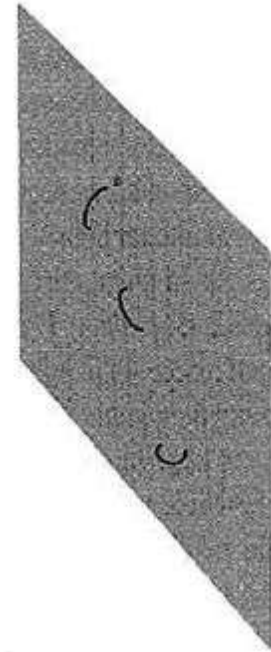
con Claudio. En efecto, Maldacena argumentó que dos mundos matemáticos que parecen completamente diferentes son de hecho exactamente el mismo. Un mundo tiene cuatro dimensiones de espacio y una de tiempo (4+1), mientras que el otro es (3+1)-dimensional, más parecido al mundo que experimentamos. Voy a tomarme una pequeña licencia para simplificar la historia y hacerla más fácil de visualizar, disminuyendo en uno el número de dimensiones en cada caso. De acuerdo con esto, yo diría que cierta versión ficticia de Planilandia —un mundo (2+1)-dimensional— es de algún modo equivalente a un mundo anti de De Sitter de (3+1)-dimensiones.

¿Cómo sería esto posible? Lo más obvio respecto al espacio es el número de dimensiones. Una incapacidad para reconocer la dimensionalidad del espacio constituiría un trastorno perceptual extraordinariamente grave. Es absolutamente imposible confundir dos dimensiones con tres, al menos para alguien cuerdo y sobrio. O al menos eso cabría pensar.

La ruta hacia el descubrimiento de Maldacena fue un camino complicado y sinuoso que discurría a través de agujeros negros extremos, D-branas y algo llamado teoría matriz⁹⁷, y finalmente acabó con una extraordinaria confirmación del principio holográfico. El punto de partida eran las D-branas de Polchinski. Recordemos que una D-brana es un objeto material que, dependiendo de su

⁹⁷ La teoría matriz en este contexto no tiene nada que ver con la matriz S. Fue una predecesora y pariente próxima del descubrimiento de Maldacena que también implicaba un misterioso crecimiento de las dimensiones. Fue el primer ejemplo de una correspondencia matemática que confirmaba el principio holográfico. La teoría matriz fue descubierta por Tom Banks, Willy Fischler, Steve Shenker y yo en 1996.

dimensión, puede ser un punto, una línea, una hoja o un sólido que llena el espacio. La propiedad importante que distingue una D-brana de cualquier otra cosa es que las cuerdas fundamentales pueden terminar en ella. Para concretar, nos centraremos en D2-branas⁹⁸. Consideremos una superficie bidimensional plana que flota, como una alfombra mágica, en un espacio tridimensional. Cuerdas abiertas pueden unirse a la D2-brana por ambos extremos. Pueden deslizarse a lo largo de la D2-brana, pero no pueden desprenderse y pasar libres a la tercera dimensión. Los trozos de cuerda patinan en una hoja de hielo metafórico sin rozamiento, incapaces de despegar sus pies de ella. Visto a distancia, cada trozo de cuerda parece una partícula que se mueve en un mundo bidimensional. Si hay más de una, las cuerdas pueden colisionar, dispersarse e incluso empalmarse para dar objetos más complicados.



Las D-branas pueden existir individualmente, pero son pegajosas. Si se acercan suavemente, se quedarán adheridas y formarán una brana compuesta de varias capas, como en la siguiente ilustración.

⁹⁸ En el trabajo original de Maldacena, él se centraba en un ejemplo que implicaba cuatro dimensiones espaciales. Se llamaría un ADS (4+1)-dimensional. La razón para trabajar con un espacio tetradimensional en lugar de las tres dimensiones habituales es técnica y no es importante para el resto de este capítulo, pero es relevante para parte del epílogo.



He mostrado las D-branas ligeramente separadas una de otra, pero cuando se adhieren los huecos desaparecen. Un grupo de D-branas adheridas se denomina *una pila de D-branas*.

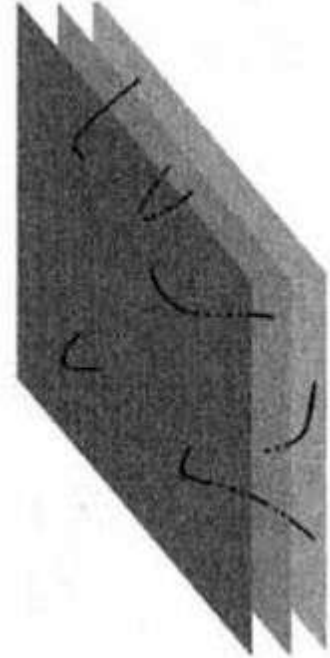
Las cuerdas abiertas que se mueven en una pila de D-branas son más variadas y más ricas en propiedades que las cuerdas que se mueven en una sola D-brana. Los dos extremos de una cuerda pueden unirse a dos miembros diferentes de la pila, como si un patín se moviera en un plano ligeramente diferente del otro. Para distinguir las diferentes branas, podemos darles nombres. Por ejemplo, en la pila mostrada arriba, podríamos llamarlas roja, verde y azul.

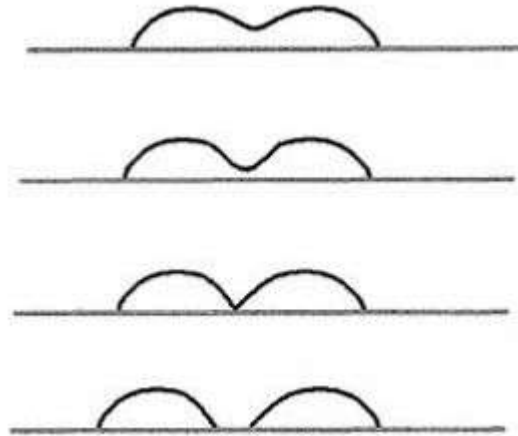
Las cuerdas que patinan en la pila de D-branas deben tener siempre sus extremos unidos a una D-brana, pero ahora hay varias posibilidades. Por ejemplo, una cuerda podría tener ambos extremos

unidos a la membrana roja. Eso la haría una cuerda roja-roja. Del mismo modo, habría cuerdas azul-azul y verde-verde. Pero también es posible que los dos extremos de una cuerda estén unidos a branas diferentes. Así, podría haber cuerdas roja-azul, cuerdas roja-verde y similares. De hecho, hay nueve posibilidades distintas para las cuerdas que se mueven en esta pila de D-branas.

Sucedan cosas interesantes si hay varias cuerdas unidas a las branas.

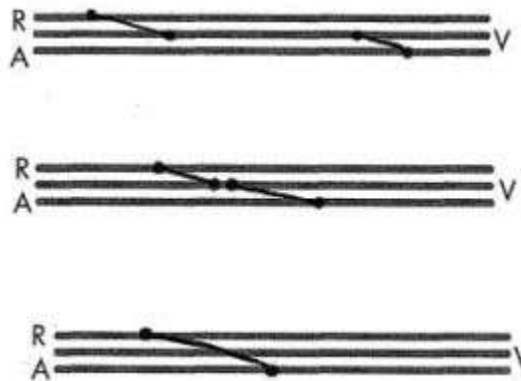
Las cuerdas en una pila de D2-branas se parecen mucho a partículas ordinarias, aunque en un mundo con sólo dos dimensiones espaciales. Interaccionan, se dispersan cuando colisionan y ejercen fuerzas sobre cuerdas vecinas. Una cuerda también puede romperse en dos cuerdas. He aquí una secuencia que muestra una cuerda en una única brana que se divide para convertirse en dos cuerdas. La secuencia temporal procede de arriba abajo.





Un punto en la cuerda inicial entra en contacto con la brana, lo que permite que la cuerda se divida en dos, pero siempre de tal manera que todos los extremos estén unidos a la brana. Esta figura puede leerse también de abajo a arriba, de modo que un par de cuerdas se empalmen para formar una única cuerda.

La siguiente es una secuencia que incluye cuerdas en una pila de tres D-branas. La secuencia muestra una cuerda roja-verde que colisiona con una cuerda verde-azul. Las dos cuerdas se fusionan para formar una única cuerda roja-azul.



Una cuerda roja-roja no puede empalmarse con una cuerda verde-verde porque sus extremos nunca se tocan.

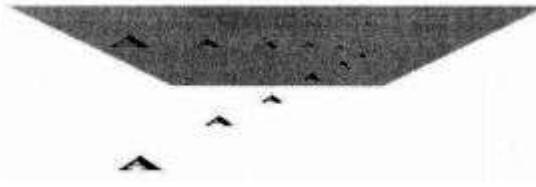
¿Tiene usted la sensación de que ya ha visto todo esto antes? La tiene, suponiendo que leyera el capítulo 19. Las reglas que gobiernan las cuerdas unidas a una pila de D-branas son exactamente las mismas que las reglas que gobiernan a los gluones en cromodinámica cuántica (QCD). En el capítulo 19 expliqué que un gluón es como un pequeño imán con dos extremos, cada uno de ellos etiquetado por un color. La similitud no termina aquí. La figura anterior, que muestra dos cuerdas que se combinan para formar una única cuerda, es igual al diagrama de vértice para un gluón en QCD.

Este paralelismo entre la «física en una D-brana» y el mundo habitual de las partículas elementales es un hecho fascinante que, como veremos en el próximo capítulo, se ha mostrado extraordinariamente útil. Cuando los físicos encuentran dos modos diferentes de describir el mismo sistema, llaman a las dos descripciones «dual una de otra». Un ejemplo es la descripción dual de la luz como partículas o como ondas. La física está llena de *dualidades*, y no hay nada especialmente sorprendente o nuevo en el hecho de que Maldacena hubiera descubierto dos descripciones duales de las cuerdas en una D-brana. Lo que era nuevo, casi inaudito⁹⁹, era que las dos descripciones describían mundos con *diferentes números de dimensiones espaciales*.

⁹⁹ Casi inaudito, pero no del todo. La teoría matriz era un ejemplo anterior.

Ya he sugerido una descripción: la versión de Planilandia (2+1)-dimensional de la QCD. Describe protones, mesones y gluébolos planas, pero como la QCD real, no contiene ningún indicio de gravedad. La otra mitad de la dualidad —la forma alternativa de describir exactamente lo mismo— describe un mundo con *espacio tridimensional*, y no sólo cualquier espacio tridimensional, sino el espacio anti De Sitter. Maldacena argumentaba que la Planilandia QCD es dual de un universo anti De Sitter (3+1)-dimensional. Además, en este mundo tridimensional, materia y energía ejercen fuerzas gravitatorias igual que en el mundo real. En otras palabras, un mundo de (2+1) dimensiones que incluye QCD pero no gravedad es equivalente a un universo de (3+1) dimensiones con gravedad.

¿Cómo sucede esto? ¿Por qué un mundo con sólo dos dimensiones sería exactamente igual que uno con tres dimensiones? ¿De dónde procede la dimensión espacial extra? La clave está en la distorsión del espacio anti De Sitter, que hace que los objetos cerca de la frontera parezcan pequeños en comparación con los mismos objetos en el interior profundo del espacio. La distorsión afecta a los demonios imaginarios, pero también a los objetos reales cuando se mueven a través del espacio. Por ejemplo, si uno proyecta una letra A de un metro en la frontera, creando una sombra, la imagen se contraería o crecería cuando el objeto se aproximara o se alejara de la frontera.



Desde el punto de vista del interior tridimensional, esto es una ilusión que no tiene más realidad que el gran tamaño de Groenlandia en un mapa de Mercator. Pero en la descripción dual — la teoría Planilandia— no hay noción de distancia en la tercera dimensión perpendicular; está reemplazada por una noción de tamaño. Ésta es una relación matemática muy sorprendente: crecimiento y contracción en la mitad Planilandia de la dualidad es exactamente lo mismo que retroceso y avance a lo largo de la tercera dirección en la otra mitad de la dualidad.

Una vez más, esto debería sonar familiar, está vez por el capítulo 18, donde descubrimos que el mundo es una especie de holograma. Las dos descripciones duales de Maldacena eran el principio holográfico en acción. Todo lo que tiene lugar en el interior del espacio anti De Sitter «es un holograma, una imagen de la realidad codificada en una lejana superficie bidimensional». Un mundo tridimensional con gravedad es equivalente a un holograma cuántico bidimensional en la frontera del espacio.

Yo no sé si Maldacena estableció la relación entre su descubrimiento y el principio holográfico, pero Ed Witten pronto lo hizo. Sólo dos meses después del artículo de Maldacena, Witten colocó su propio artículo en Internet, que llevaba como título «Espacio anti De Sitter y holografía».

De todas las cosas en el artículo de Witten, la que captó mi atención en especial era una sección sobre agujeros negros. El espacio anti De Sitter —la versión original, no la versión de pared de ladrillos aplanada— es como una lata de sopa. Las secciones horizontales a través de la lata representan el espacio; el eje vertical de la lata es el tiempo. La etiqueta en el exterior de la lata es la frontera, y el interior es el propio continuo espacio-temporal.

El ADS puro es como una lata vacía, pero puede hacerse más interesante si se llena con «sopa», es decir, materia y energía.

Witten explicaba que inyectando suficiente masa y energía en la lata, podría crearse un agujero negro. Eso planteaba una pregunta. Según Maldacena, debe haber una segunda descripción —una descripción dual— que no hace referencia al interior de la lata. La descripción alternativa sería una descripción en términos de teoría cuántica de campos bidimensional de partículas similares a gluones que se mueven en la etiqueta. La existencia de un agujero negro en la sopa debía ser equivalente a algo en el holograma frontera, pero ¿qué era ese algo? En la teoría frontera, Witten argumentaba que el agujero negro en la sopa era equivalente a un fluido caliente ordinario de partículas elementales, básicamente sólo gluones.

En cuanto vi el artículo de Witten supe que la guerra de los agujeros negros había terminado. La teoría cuántica de campos es un caso



especial de la mecánica cuántica, y en mecánica cuántica la información nunca puede destruirse. Aparte de otras implicaciones que pudieran tener, los trabajos de Maldacena y Witten habían demostrado más allá de cualquier sombra de duda que la información nunca se perdería en el interior de un agujero negro. Los teóricos de cuerdas podían entenderlo inmediatamente; los relativistas necesitarían más tiempo. Pero la guerra había terminado.

Aunque la guerra de los agujeros negros debería haber concluido a principios de 1998, Stephen Hawking era como uno de esos soldados infortunados que viven en la selva durante años sin saber que las hostilidades han terminado. Para entonces se había convertido en una figura trágica. Con cincuenta y seis años, ya no en la cumbre de sus potencias intelectuales y casi incapaz de comunicarse, Stephen no captó la idea. Estoy seguro de que no era por limitaciones intelectuales. Por los encuentros que he tenido con él después de 1998, era obvio que su mente seguía siendo extraordinariamente aguda. Pero sus capacidades físicas estaban tan deterioradas que estaba casi completamente encerrado en su propia cabeza. Sin forma de escribir una ecuación y con tremendas dificultades para colaborar con otros, para él debía ser imposible hacer lo que los físicos hacen normalmente para entender el trabajo nuevo y poco familiar. Por eso Stephen siguió luchando durante algún tiempo.

No mucho después de la publicación del artículo de Witten, tuvo lugar otra conferencia en Santa Bárbara, esta vez una celebración

de la holografía y del descubrimiento de Maldacena. El orador de sobremesa era Jeff Harvey (la H de CGHS), pero en lugar de dar una charla, él animó a todos a cantar y bailar una canción de victoria, *La Maldacena*, con una letra adaptada al ritmo y la música de *Macarena*.

*Tú partes de la brana,
y la brana es BPS¹⁰⁰.
Luego te acercas a la brana,
y el espacio es ADS.
Quien sabe lo que significa,
confieso que yo no.
¡Ehhh! ¡Maldacena!
Super Yang Mills,
con N muy alto.
Gravedad en una esfera,
flujo sin fin.
Quien dice que son lo mismo,
holografía afirma.
¡Ehhh! ¡Maldacena!
Los agujeros negros solían ser,
un gran misterio.
Ahora utilizamos D-branas,
para calcular D-entropía.
Y cuando la D-brana está caliente,
D-energía libre.*

¹⁰⁰ BPS es una propiedad técnica de las D-branas. BPS son las iniciales de los tres autores — Bogomol'nyu, Prasad y Sommerfield— que descubrieron dicha propiedad.

¡Ehhh! ¡Maldacena!
La teoría M está completada,
Juan tiene gran reputación.
Hemos dominado el agujero negro,
con QCD hacemos computación.
Pero el espectro de las gluébolos,
esta aún en discusión.
¡Ehhh! ¡Maldacena!¹⁰¹

¹⁰¹ Letra © Jeff Harvey.

Capítulo 23

¿Física nuclear? ¡Estás dando a luz!

Los escépticos dirán que todo lo que le he contado sobre las propiedades cuánticas de los agujeros negros —desde entropía, temperatura y radiación de Hawking hasta la complementariedad de agujero negro y el principio holográfico— es pura teoría, sin una pizca de datos experimentales que lo confirmen. Por desgracia, pueden estar en lo cierto durante mucho tiempo.

Dicho esto, recientemente se ha revelado una conexión inesperada: una conexión entre agujeros negros, gravedad cuántica, el principio holográfico y la física nuclear experimental, que puede de una vez por todas desmentir la afirmación de que estas teorías están más allá de la confirmación científica. A este respecto, la física nuclear parece un lugar poco prometedor para comprobar ideas tales como el principio holográfico y la complementariedad de agujero negro. Pocos dirían hoy que la física nuclear esté en la vanguardia de la ciencia. Es un tema viejo, y la mayoría de los físicos, yo incluido, piensan que ha agotado su capacidad para enseñarnos algo nuevo sobre principios fundamentales. Desde el punto de vista de la física moderna, los núcleos son como buñuelos: enormes bolas blandas que están básicamente llenas de espacio vacío¹⁰². ¿Qué podrían enseñarnos sobre la física en la escala de Planck? Sorprendentemente, parece que mucho.

¹⁰² Es interesante calcular la densidad de masa de un nucleón en unidades de Planck. El radio de un protón es del orden de 10^{20} y la masa es del orden de 10^{-19} . Esto da una masa por unidad de volumen del orden de 10^{-79} .

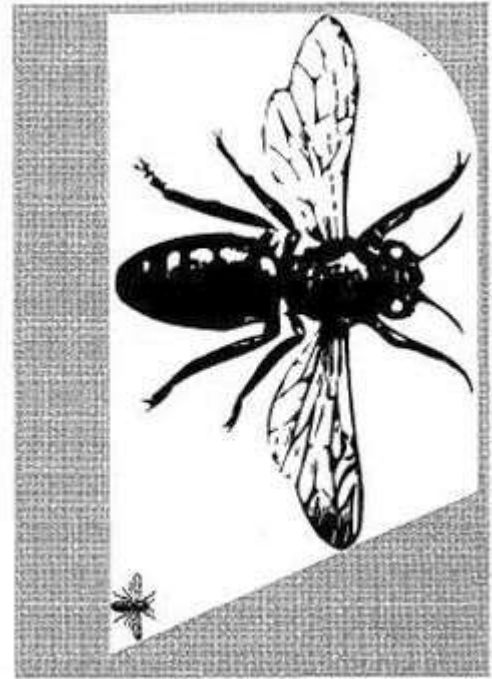
Los teóricos de cuerdas siempre se han interesado por los núcleos. La prehistoria de la teoría de cuerdas trataba de hadrones: protones, neutrones, mesones y gluéobolas. Como los núcleos, estas partículas son compuestos grandes y blandos hechos de quarks y gluones. Pero parece que en una escala cien trillones de veces mayor que la escala de Planck, la Naturaleza se repite a sí misma. Las matemáticas de la física de los hadrones resultan ser casi las mismas que las matemáticas de la teoría de cuerdas. Esto parece extraordinariamente sorprendente a la vista de la diferencia de escalas: los nucleones pueden ser de un tamaño 10^{20} veces mayor que las cuerdas fundamentales, y oscilan 10^{20} veces más despacio. ¿Cómo es posible que estas teorías sean iguales, o siquiera remotamente similares? Sin embargo, lo son, en cierta manera que se hará clara. Y si las partículas subnucleares ordinarias son realmente similares a cuerdas fundamentales, ¿por qué no poner a prueba las ideas de la teoría de cuerdas en los laboratorios de física nuclear? De hecho, lleva haciéndose desde hace casi cuarenta años. La conexión entre hadrones y cuerdas es uno de los pilares de la moderna física de partículas, pero hasta hace muy poco no era posible poner a prueba el equivalente nuclear a la física de los agujeros negros. Esa situación está cambiando ahora.

En Long Island, a unos ciento veinte kilómetros de Manhattan, los físicos nucleares del Laboratorio Nacional de Brookhaven están haciendo chocar núcleos atómicos pesados para ver lo que sucede. El Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC) acelera núcleos de oro hasta casi la velocidad de la luz, suficientemente rápidos

para que cuando colisiones creen una enorme salpicadura de energía cien millones de veces más caliente que la superficie del Sol. Los físicos de Brookhaven no están interesados en armas nucleares ni en ninguna otra tecnología nuclear. Su motivación es la pura curiosidad; curiosidad sobre las propiedades de una nueva forma de materia. ¿Cómo se comporta este material nuclear caliente? ¿Es un gas? ¿Un líquido? ¿Se mantiene unido o se evapora instantáneamente en partículas independientes? ¿Expulsa chorros de partículas de energía muy alta?

Como he dicho, la física nuclear y la gravedad cuántica tienen lugar en escalas enormemente diferentes, así que ¿cómo pueden tener algo que ver una con otra? La mejor analogía que conozco incluye una de las peores películas de siempre, un viejo film de terror de la era de los autocines. En la película aparece una mosca monstruosa. No sé cómo se hizo la película, pero imagino que se filmó una mosca casera ordinaria y luego se amplió para que llenara toda la pantalla. La imagen se proyectaba a cámara muy lenta, lo que daba a la mosca la ominosa sensación de un pájaro enorme y desagradable. El resultado era aterrador, pero lo importante es que ilustra casi perfectamente la relación entre gravitones y gluébolos. Ambos son cuerdas cerradas, pero el gravitón es mucho más pequeño y más rápido que la gluébola, unas 10^{20} veces más pequeño y más rápido. Parece que los hadrones son como imágenes de cuerdas fundamentales ampliadas y frenadas no unos pocos cientos de veces como la mosca, sino unas fantásticas 10^{20} veces.

De modo que si no podemos hacer que colisionen partículas de tamaño de Planck a energías enormes para formar agujeros negros, quizá podamos hacer colisionar sus versiones ampliadas — gluébolos, mesones o nucleones— y crear una versión ampliada de un agujero negro. Pero ¡espere!, ¿no requiere eso cantidades prodigiosas de energía? No, no lo hace, y para entender por qué, necesitamos recordar del capítulo 16 la conexión contraintuitiva del siglo XX entre tamaño y masa: *lo pequeño es pesado, lo grande es ligero*. El hecho de que la física nuclear tenga lugar en una escala inmensamente mayor que la teoría de cuerdas fundamental implica que los fenómenos correspondientes requieren mucha menos energía y concentrada en un volumen enormemente mayor. Cuando se introducen los números y se hacen los cálculos, se obtiene que cuando colisionen núcleos ordinarios en el RHIC debería formarse algo muy parecido a un agujero negro ampliado y a cámara lenta.



Para entender en qué sentido los agujeros negros se crean en RHIC, debemos volver al principio holográfico y al descubrimiento de Juan Maldacena. De un modo que nadie había previsto, Maldacena encontró que dos teorías matemáticas diferentes eran realmente la misma: «duales una de otra», en la jerga de la teoría de cuerdas.

Una teoría era la teoría de cuerdas, con sus gravitones y agujeros negros, aunque en un Espacio anti De Sitter (ADS) (4+1)-dimensional. (En el capítulo 22, con fines de visualización, me tomé la libertad de disminuir las dimensiones del espacio. En este capítulo recupero la dimensión perdida).

Cuatro dimensiones de espacio es demasiado para la física nuclear, pero recordemos el principio holográfico: todo lo que tiene lugar en ADS debe ser completamente describable mediante una teoría matemática con una dimensión espacial menos. Puesto que Maldacena empezó con cuatro dimensiones espaciales, la teoría dual holográfica tiene sólo tres dimensiones, el mismo número que el espacio cotidiano. ¿Podría esta descripción holográfica ser similar a cualquiera de las teorías que utilizamos para describir la física convencional?

Resulta que la respuesta es sí: el dual holográfico es matemáticamente muy similar a la cromodinámica cuántica (QCD), la teoría de quarks, gluones, hadrones y núcleos.

Gravedad cuántica en ADS \leftrightarrow QCD

Para mí, lo más interesante del trabajo de Maldacena era la forma en que confirmaba el principio holográfico y arrojaba luz sobre el funcionamiento de la gravedad cuántica. Pero Maldacena y Witten vieron otra oportunidad. Comprendieron —de forma brillante, debo decir— que el principio holográfico es una calle de doble dirección. ¿Por qué no leerlo hacia atrás? Es decir, utilizar lo que sabemos sobre la gravedad —en este caso, gravedad en un ADS (4+1)-

dimensional— para aprender cosas sobre teoría cuántica de campos ordinaria. Para mí, esto era un giro totalmente inesperado, un premio añadido del principio holográfico en el que nunca había pensado.

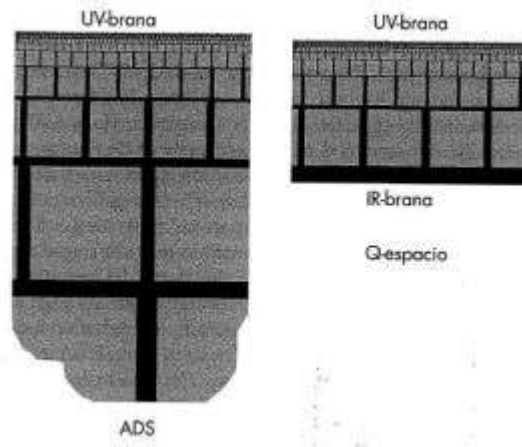
Se requería algún trabajo para conseguirlo. La QCD no es exactamente lo mismo que la teoría de Maldacena, pero la diferencia principal puede ser tenida en cuenta fácilmente modificando el ADS de una forma sencilla. Revisemos el ADS desde un punto de vista muy próximo a la frontera (donde el último demonio visible se contrae a cero). Voy a llamar a dicha frontera la *UV-brana*¹⁰³. UV significa ultravioleta —el mismo término que utilizamos para la luz de longitud de onda muy corta—. (Con los años, el término ultravioleta ha llegado a representar cualquier fenómeno que tiene lugar en escalas pequeñas. En el contexto actual, la palabra se refiere al hecho de que los ángeles y los demonios próximos a la frontera del grabado de Escher se contraen a un tamaño infinitesimal). La palabra *brana* es en realidad un término inadecuado en *UV-brana*, pero puesto que ha calado, la utilizaré. La UV-brana es una superficie próxima a la frontera.

Imaginemos que nos alejamos de la UV-brana y nos movemos hacia el interior, donde los demonios cuadrados se expanden y los relojes se frenan sin límite. Objetos que son pequeños y rápidos cerca de la UV-brana se hacen grandes y lentos cuando profundizamos en el ADS. Pero el ADS no es exactamente lo correcto para describir la QCD. Aunque la diferencia no es grande, el espacio modificado

¹⁰³ Mucho de lo que estoy describiendo en estos párrafos se explica con gran claridad en el excelente libro *Warped Passages* de Lisa Randall.

merece su propio nombre; llamémosle *Q-espacio*. Como el ADS, el Q-espacio tiene una UV-brana donde las cosas se contraen y se aceleran, pero a diferencia del ADS, hay una segunda frontera llamada la *IR-brana*.

(IR significa infrarroja, un término utilizado para luz de longitud de onda muy larga). La IR-brana es una segunda frontera, una especie de barrera impenetrable donde los ángeles y los demonios alcanzan su tamaño máximo. Si la UV-brana es el techo de una grieta sin fondo, el Q-espacio es una habitación ordinaria con techo y suelo. Ignorando la dirección del tiempo y dibujando sólo dos dimensiones espaciales, el ADS y el Q-espacio tienen este aspecto:



Imagine que colocamos una partícula tipo cuerda en el Q-espacio situándola primero cerca de la UV-brana. Como los ángeles y los demonios que la rodean, parecerá muy pequeña —posiblemente del tamaño de Planck— y muy rápidamente vibrante. Pero si la misma partícula se acerca a la IR-brana, parecerá crecer, casi como si se estuviera proyectando en una pantalla que se aleja. Observemos

ahora la cuerda cuando vibra. Las vibraciones definen un tipo de reloj, y como todos los relojes, marcha rápido cuando está cerca de la UV-brana y lento cuando se mueve hacia la IR-brana. Una cuerda cerca del extremo IR no sólo parecerá una versión gigante ampliada de su yo UV comprimida, sino que también oscilará mucho más lentamente. Esta diferencia se parece mucho a la diferencia entre moscas reales y sus imágenes cinematográficas —o la diferencia entre cuerdas fundamentales y sus contrapartidas nucleares.

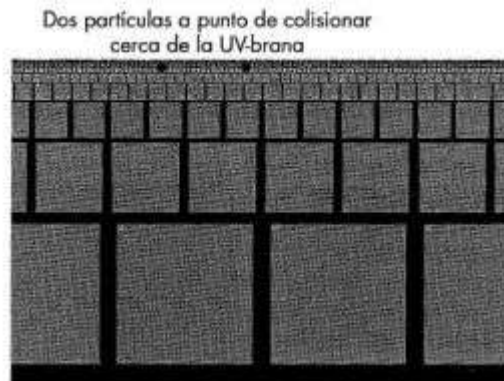
Si las partículas superpequeñas de tamaño de Planck de la teoría de cuerdas «viven» cerca de la UV-brana, y sus versiones ampliadas — los hadrones— viven cerca de la UV-brana, ¿a qué distancia están unas de otras? En cierto sentido, no muy lejos; habría que descender a través de unos 66 demonios cuadrados para ir desde objetos de tamaño de Planck hasta hadrones. Pero recordemos que cada paso es dos veces tan alto como el anterior. Doblar el tamaño 66 veces es lo mismo que expandir en un factor de 10^{20} .

Hay dos visiones de la similitud entre la teoría de cuerdas fundamental y la física nuclear. La visión más conservadora dice que es una similitud accidental, más o menos como la similitud entre los átomos y el Sistema Solar. Esta similitud fue útil en los primeros días de la física atómica. Niels Bohr, en su teoría del átomo, utilizó las mismas matemáticas para los átomos que Newton había utilizado para el Sistema Solar. Pero ni Bohr ni ningún otro pensaba realmente que el Sistema Solar fuera una versión ampliada de un átomo. Según esta visión más conservadora, la conexión entre gravedad cuántica y física nuclear también es tan sólo una analogía

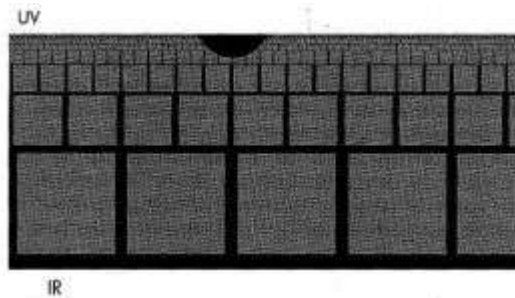
matemática, pero una analogía útil que nos permite utilizar las matemáticas de la gravedad para explicar ciertas características de la física nuclear.

La visión más excitante es que las cuerdas nucleares son realmente los mismos objetos que las cuerdas fundamentales, pero vistos a través de una lente distorsionante que estira sus imágenes y las frena. Según esta visión, cuando una partícula (o cuerda) está situada cerca de la UV-brana, aparece pequeña, energética y rápidamente oscilante. Se parece a una cuerda fundamental; se comporta como una cuerda fundamental; así que debe ser una cuerda fundamental. Por ejemplo, una cuerda cerrada situada en la UV-brana sería un gravitón. Pero la misma cuerda, si se traslada a la IR-brana, se frena y su tamaño crece. En todos los aspectos parece y se comporta como una gluébola. En esta visión de las cosas, gravitones y gluébolos son exactamente los mismos objetos, excepto por su localización en el sándwich de branas.

Imaginemos un par de gravitones (cuerdas cerca de la UV-brana) a punto de colisionar entre sí.

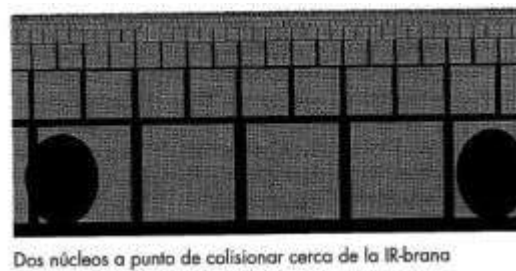


Si tienen suficiente energía, cuando se encuentren cerca de la UV-brana se formará un pequeño agujero negro ordinario: una gota de energía adherida a la UV-brana. Considérela como una gota de fluido que cuelga del techo. Los bits de información que constituyen su horizonte son de tamaño de Planck.



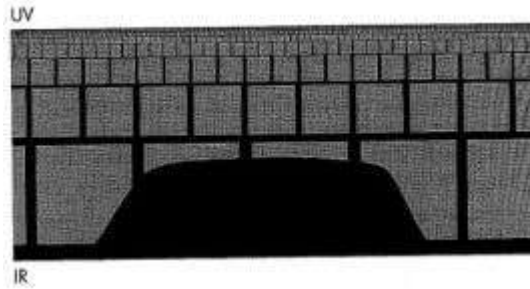
Ése es, por supuesto, exactamente el experimento que probablemente nunca seremos capaces de hacer.

Pero reemplacemos ahora los gravitones por dos núcleos (cerca de la IR-brana) y lancémoslos uno contra otro.



Aquí es donde se deja sentir el poder de la dualidad. Por un lado, podemos considerarlo en la versión tetradimensional, en la que dos objetos colisionan y forman un agujero negro. Esta vez el agujero negro estará cerca de la IR-brana, como una gran mancha húmeda

en el suelo. ¿Cuánta energía se requiere? Mucho menos que cuando se forma el agujero negro cerca de la UV-brana. De hecho, la energía está dentro del alcance de RHIC.



También podemos verlo desde el punto de vista tridimensional. En este caso, los hadrones o los núcleos colisionan y producen una salpicadura de quarks y gluones.

Originalmente, antes de que nadie se diera cuenta de la conexión de la QCD con la física de los agujeros negros, los expertos en QCD habían esperado que la energía de la colisión reaparecería como un gas de partículas que rápidamente saldrían disparadas sin apenas resistencia. Pero lo que ellos vieron era diferente: la energía se mantiene en lo que se parece mucho más a una gota de fluido: la llamamos sopa de quarks.

La sopa de quarks caliente no es un fluido cualquiera; tiene algunas propiedades muy sorprendentes de un flujo que a nada se parecen más que al horizonte de un agujero negro.

Todos los fluidos son viscosos. La viscosidad es un tipo de fricción que actúa entre las capas de un fluido cuando deslizan unas frente a otras. La viscosidad es lo que distingue un fluido muy viscoso,

como la miel, de un fluido mucho menos viscoso, como el agua. La viscosidad no es sólo un concepto cualitativo. De hecho, para todo fluido, hay una medida numérica precisa llamada *viscosidad de cizalla*¹⁰⁴.

Los teóricos habían aplicado inicialmente métodos de aproximación estándar y concluyeron que la sopa de quarks caliente tendría mucha viscosidad. Todo el mundo quedó muy sorprendido cuando resultó tener una viscosidad asombrosamente pequeña¹⁰⁵. Bueno, todos excepto algunos pocos físicos nucleares que sabían un poco sobre la teoría de cuerdas.

Según una cierta medida cuantitativa de la viscosidad, la sopa de quarks caliente es el fluido menos viscoso conocido por la ciencia, mucho menos viscoso que el agua. Incluso el helio superfluido (el campeón anterior de la baja viscosidad) es mucho más viscoso.

¿Hay algo en la Naturaleza que pueda rivalizar con la baja viscosidad de la sopa de quarks? Lo hay, pero no es un fluido ordinario. El horizonte de un agujero negro se comporta como un fluido cuando es perturbado. Por ejemplo, si un agujero negro pequeño cae dentro de un agujero negro más grande, crea temporalmente una protuberancia en el horizonte, similar a la protuberancia que una gota de miel deja si se deja caer en la superficie de un estanque de miel. La gota en el horizonte se esparce como lo hace un fluido viscoso. Hace tiempo, los físicos de agujeros negros calcularon la viscosidad de un horizonte, y cuando se

¹⁰⁴ La palabra cizalla se refiere al deslizamiento de una capa respecto a otra.

¹⁰⁵ Estrictamente hablando, es la viscosidad dividida por la entropía del fluido la que es tan pequeña.

tradujo en términos de fluidos ganó con facilidad al helio superfluido. Cuando los teóricos de cuerdas empezaron a sospechar una conexión entre agujeros negros y colisiones nucleares¹⁰⁶ se dieron cuenta de que, de todas las cosas, la sopa de quarks caliente es muy parecida al horizonte de un agujero negro.

¿En qué se convierte finalmente la gota de fluido? Como un agujero negro, se evapora en una variedad de partículas, incluidas nucleones, mesones, fotones, electrones y neutrinos. Viscosidad y evaporación son sólo dos entre varias propiedades que comparten horizontes y sopa de quarks.

El fluido nuclear es ahora objeto de intenso estudio para averiguar si otras propiedades muestran conexiones similares con la física de agujeros negros. Si esa tendencia continúa, significará que tenemos una extraordinaria ventana al mundo de la gravedad cuántica, ampliada en tamaño y frenada en frecuencia, de modo que la distancia de Planck se hace no mucho menor que un protón. Esto nos dará una extraordinaria oportunidad para confirmar las teorías de Hawking y Bekenstein, así como la complementariedad de agujero negro y el principio holográfico.

Se ha dicho que la paz no es sino el breve interludio entre guerras. Pero en ciencia, como ha dicho certeramente Thomas Kuhn, lo cierto es lo contrario: la mayor parte de la «ciencia ordinaria» se hace durante los largos períodos pacíficos y monótonos entre hostilidades. La guerra de los agujeros negros llevó a una violenta

¹⁰⁶ Pavel Kovtun, Dam T. Son y Andrei O. Starinets —tres físicos teóricos de la Universidad de Washington en Seattle— fueron los primeros en reconocer las implicaciones del principio holográfico para las propiedades viscosas de la sopa de quarks caliente.

reestructuración de las leyes de la física, pero ahora estamos viendo cómo se abre camino entre las actividades cotidianas del lado más mundano de la física. Como muchas ideas revolucionarias anteriores, el principio holográfico está evolucionando desde un cambio radical de paradigma a una herramienta de trabajo cotidiana de la física nuclear.

Capítulo 24

Humildad

Somos tan sólo una avanzada raza de monos en un planeta menor de una estrella muy corriente. Pero podemos entender el universo. Eso nos hace algo muy especial.

STEPHEN HAWKING

Recablearnos para la relatividad fue bastante difícil, y hacerlo para la mecánica cuántica fue mucho más difícil. Había que abandonar la predictibilidad y el determinismo, y las fallidas reglas clásicas de la lógica tenían que ser reemplazadas por lógica cuántica. Incertidumbre y complementariedad se expresaban en términos de espacios de Hilbert abstractos de dimensión infinita, relaciones de conmutación matemática y otros extraños inventos de la mente.

A lo largo de todo el recableado del siglo XX, al menos hasta mediados de los años noventa, la realidad del espacio-tiempo y la objetividad de los sucesos no fueron cuestionadas. Se suponía universalmente que la gravedad cuántica no desempeñaría ningún papel cuando se llegara a las propiedades a gran escala del espacio-tiempo. Stephen Hawking, con su paradoja de la información, fue uno de los que sin saberlo, y más bien sin quererlo, nos obligó a salir de ese esquema mental.

Las nuevas ideas del mundo físico que se han desarrollado hace poco más de un década implican un nuevo tipo de relatividad y un nuevo tipo de complementariedad cuántica. El significado objetivo de la simultaneidad (de dos sucesos) se vino abajo en 1905, pero el concepto de suceso propiamente dicho seguía sólido como una roca. Si una reacción nuclear tiene lugar en el Sol, todos los observadores estarán de acuerdo en que sucedió en el Sol. Nadie lo percibirá como si hubiera tenido lugar en la Tierra. Pero algo nuevo sucede en el poderoso campo gravitatorio de un agujero negro, algo que socava la objetividad de los sucesos. Sucesos que un observador en caída ve que están en el interior profundo de un enorme agujero negro, otro observador los detecta fuera del horizonte, revueltos entre los fotones de la radiación de Hawking. Un suceso no puede estar a la vez detrás del horizonte y delante de él. El mismo suceso está o detrás del horizonte o delante del horizonte, dependiendo de qué observador haga el experimento. Pero incluso la gran extrañeza de la complementariedad no es nada comparada con el extraño principio holográfico. Parece que el mundo sólido tridimensional es una especie de ilusión, y lo real tiene lugar en las fronteras del espacio.

Para la mayoría de nosotros, la ruptura de conceptos tales como simultaneidad (en la relatividad especial) y determinismo (en mecánica cuántica) no son más que oscuras rarezas en las que sólo están interesados unos pocos físicos. Pero, en realidad, lo cierto es lo contrario: es la lentitud agónica del movimiento humano y la masa de los 10^{28} átomos del cuerpo humano las que son extrañas

excepciones en la Naturaleza. Hay aproximadamente 10^{80} partículas elementales en el universo por cada humano. La mayoría de ellas se mueven a una velocidad próxima a la de la luz y son muy inciertas, si no por donde están, sí por la rapidez con que se mueven.

La debilidad de la gravedad que experimentamos en la Tierra es también una excepción. El universo nació en un estado de violenta expansión; cada punto del espacio estaba rodeado por todas partes de horizontes a una distancia menor que un protón. Los habitantes más notables del universo, las galaxias, están construidos en torno a agujeros negros gigantes que continuamente están engullendo estrellas y planetas. De cada 10 000 000 000 bits de información en el universo, 9 999 999 999 están asociados con los horizontes de agujeros negros. Debería ser evidente que nuestras ingenuas ideas sobre espacio, tiempo e información son completamente inadecuadas para entender la mayor parte de la Naturaleza.

El recableado para la gravedad cuántica está lejos de ser completo. Creo que todavía no tenemos un marco apropiado para reemplazar el antiguo paradigma de espacio-tiempo objetivo. Las potentes matemáticas de la teoría de cuerdas son una ayuda. Nos proporcionan un marco riguroso para poner a prueba ideas que, de otra forma, sólo podríamos discutir filosóficamente. Pero la teoría de cuerdas es una obra en curso incompleta. No conocemos sus principios definitorios, o si es el nivel más profundo de realidad o sólo otra teoría provisional. La guerra de los agujeros negros nos ha enseñado algunas lecciones muy importantes e inesperadas, pero son sólo un indicio de lo diferente que es la realidad de nuestro

modelo mental, incluso después de recablear el modelo para la relatividad y la mecánica cuántica.

Horizontes cósmicos

La guerra de los agujeros negros ha terminado (esta afirmación puede sorprender a un puñado de personas que todavía están luchando en ella), pero precisamente cuando lo hacía, la Naturaleza, la gran aguafiestas, nos lanzó otra bola curva. Casi al mismo tiempo que el descubrimiento de Maldacena, los físicos empezaron a convencerse (por obra de los cosmólogos) de que vivimos en un mundo con una *constante cosmológica* no nula. Sorprendentemente pequeña¹⁰⁷, muchísimo más pequeña, de lejos, que cualquier otra constante física, la constante cosmológica es el determinante principal de la historia futura del universo.

La constante cosmológica, también conocida como energía oscura, ha sido una espina clavada en el costado de la física durante casi un siglo. En 1917 Einstein especuló sobre un tipo de antigravedad que haría que cualquier cosa en el universo repeliera a cualquier otra, contrarrestando la atracción usual de la gravedad. La especulación no era en modo alguno, ociosa sino que estaba firmemente basada en las matemáticas de la relatividad general. Había lugar en las ecuaciones para un término extra que Einstein llamó el término cosmológico. La intensidad de la nueva fuerza era

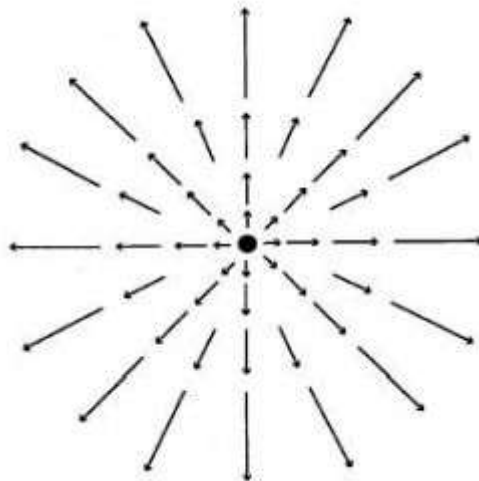
¹⁰⁷ El valor numérico de la constante cosmológica es del orden de 10^{-120} en unidades de Planck. La sospecha de que existe una constante cosmológica empezó a mediados de los años ochenta entre algunos cosmólogos que examinaron detalladamente los datos astronómicos. Pero realmente no atrajo mucho a la comunidad de la física durante más de una década. La increíble pequeñez de su valor había engañado a todos los físicos haciéndoles creer que no existía.

proporcional a una nueva constante de la Naturaleza, la denominada constante cosmológica, denotada por la letra griega lambda (Λ). Si Λ es positiva, el término cosmológico crea una fuerza repulsiva que aumenta con la distancia; si es negativa, la nueva fuerza es atractiva; si Λ es cero, no hay nueva fuerza y podemos ignorarla.

Al principio Einstein conjeturó que Λ sería positiva, pero pronto llegó a aborrecer la idea, que calificó como su peor error. Durante el resto de su vida, hizo Λ igual a cero en todas sus ecuaciones. La mayoría de los físicos estaban de acuerdo con Einstein, aunque no entendían por qué Λ debería estar ausente de sus ecuaciones. Pero durante la década pasada, el argumento astronómico a favor de una pequeña constante cosmológica positiva se ha hecho persuasivo.

La constante cosmológica, y todos los enigmas y paradojas que ha creado, son el tema de mi libro *El paisaje cósmico*. Aquí sólo le diré su consecuencia más importante: la fuerza repulsiva, actuando a distancias cosmológicas, hace que el universo se expanda *exponencialmente*. No hay nada nuevo en que el universo se esté expandiendo, pero sin una constante cosmológica la velocidad de expansión se reduciría gradualmente. En realidad, incluso podría invertirse y empezar a contraerse, hasta implosionar finalmente en un estrujamiento cósmico gigante. En lugar de ello, como consecuencia de la constante cosmológica, el universo parece estar duplicando su tamaño cada quince mil millones de años, y todo apunta a que lo hará indefinidamente.

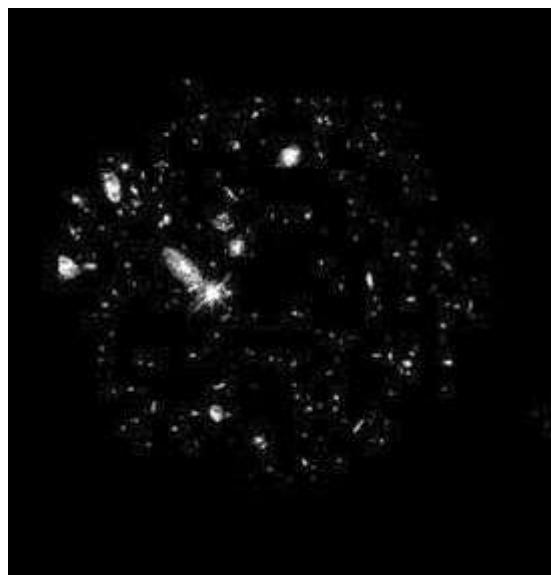
En un universo en expansión, o para el caso en un globo en expansión, cuanto mayor es la distancia entre dos puntos, más rápidamente se alejan uno de otro. La relación entre distancia y velocidad se llama ley de Hubble, y dice que la velocidad con que se alejan dos puntos cualesquiera es proporcional a la distancia que los separa. Cualquier observador, no importa dónde esté situado, mira a su alrededor y ve que las galaxias distantes se alejan a una velocidad proporcional a su distancia.



Si usted mira suficientemente lejos en semejante universo en expansión, llegará a un punto en donde las galaxias se están alejando de usted a la velocidad de la luz. Una de las propiedades más notables de un universo en expansión exponencial es que la distancia a dicho punto no cambia nunca. Parece que en nuestro propio universo, a una distancia de unos quince mil millones de años luz, las cosas se están alejando a la velocidad de la luz, pero,

lo que es incluso más importante, siempre será así por toda la eternidad.

Hay en esto algo familiar aunque diferente. Nos trae a la mente el lago de renacuajos en el capítulo 2. En algún instante Alicia, si sigue el flujo, rebasará el punto de no retorno y se alejará de Bernardo a la velocidad del sonido. Algo similar tiene lugar a gran escala. En cualquier dirección que miremos, las galaxias están rebasando el punto en el que se alejan de nosotros a más velocidad que la luz. Cada uno de nosotros está rodeado por un *horizonte cósmico* —una esfera donde las cosas se alejan a la velocidad de la luz— y ninguna señal puede llegarnos desde más allá de dicho horizonte. Cuando una estrella rebasa el punto de no retorno, ha desaparecido para siempre. Muy lejos, a unos quince mil millones de años luz, nuestro horizonte cósmico está engullendo galaxias, estrellas y probablemente incluso vida. Es como si todos viviéramos en nuestro propio agujero negro privado.



¿Existen realmente mundos como el nuestro que rebasaron hace tiempo nuestro horizonte y se hicieron completamente irrelevantes para lo que podamos detectar alguna vez? Peor aún, ¿está la mayor parte del universo fuera de nuestro conocimiento para siempre? Esto resulta muy perturbador para algunos físicos. Hay una filosofía que dice que si algo es inobservable —inobservable en teoría— no es parte de la ciencia. Si no hay manera de refutar o confirmar una hipótesis, ésta pertenece al ámbito de la especulación metafísica, junto con la astrología y el espiritismo. Por esa regla, la mayor parte del universo no tiene realidad científica: es sólo un producto de nuestra imaginación.

Pero es difícil desechar la mayor parte del universo como algo sin sentido. No hay ninguna prueba de que las galaxias se atenúen o acaben en el horizonte. La observación astronómica indica que continúan hasta donde el ojo, o el telescopio, puede ver. ¿Qué vamos a hacer en esta situación?

Ha habido otras circunstancias en el pasado en las que cosas «inobservables» han sido descartadas por no ser científicas. Las emociones de otras personas son un ejemplo notable. Toda una escuela de psicología, el conductismo, estaba basada en el principio de que emociones y estados internos de conciencia no son observables, y por consiguiente no deberían ser invocados en una discusión científica. Sólo los comportamientos observables de los sujetos experimentales —sus movimientos corporales, gestos faciales, temperatura, presión sanguínea— eran juego limpio para la

psicología conductista. El conductismo ejerció una enorme influencia durante mediados del siglo XX, pero hoy la mayoría de la gente lo considera un punto de vista extremo. Quizá deberíamos aceptar simplemente mundos más allá del horizonte de la misma forma que asumimos que otras personas tienen una vida interior impenetrable.

Sin embargo, puede haber una respuesta mejor. Las propiedades de los horizontes cósmicos parecen ser muy similares a las de los agujeros negros. Las matemáticas de un universo acelerado (en expansión exponencial) implican que a medida que las cosas se acercan al horizonte cósmico, las vemos frenarse. Si pudiéramos enviar un termómetro unido al extremo de un largo cable hasta la vecindad del horizonte cósmico, descubriríamos que la temperatura aumenta, aproximándose finalmente a una temperatura infinita en el horizonte de un agujero negro. ¿Significa eso que todas las personas en esos planetas distantes se están asando? La respuesta es que no más, o no menos, que lo que estarían si estuvieran cerca de un agujero negro. Para los observadores que viajan con el flujo, pasar el horizonte cósmico es un no-suceso, un punto matemático de no retorno. Pero nuestras propias observaciones, complementadas con algo de análisis matemático, indicarían que se están acercando a una región de temperatura increíble.

¿Qué sucede con sus bits de información? Los mismos argumentos que Hawking utilizó para demostrar que los agujeros negros irradian radiación de cuerpo negro nos dicen que los horizontes cósmicos también irradian. En este caso, la radiación no es hacia

fuera, sino hacia dentro, como si viviéramos en una habitación con paredes calientes radiantes. Desde nuestra perspectiva parecería que a medida que las cosas se mueven hacia el horizonte, se calientan y son reirradiadas como fotones. ¿Podría ser que haya un principio de complementariedad cósmica?

Para un observador dentro de un horizonte cósmico, el horizonte es una capa caliente compuesta de átomos de horizonte que absorben, revuelven y luego devuelven todos los bits de información. Para un observador que se mueve libremente y atraviesa el horizonte cósmico, el paso es un no-suceso.

De momento, sin embargo, entendemos muy poco sobre horizontes cósmicos. El significado de los objetos tras el horizonte —si son reales y qué papel desempeñan en nuestra descripción del universo— puede ser la pregunta más profunda de la cosmología.

Piedras que caen y planetas en órbita son pálidos indicios de lo que es realmente la gravedad. Los agujeros negros son lugares donde la gravedad muestra su verdadero estatus. Los agujeros negros no son meramente estrellas densas; más bien son los reservorios de información definitivos, donde los bits están empaquetados tan estrechamente como una pila bidimensional de balas de cañón, pero en una escala treinta y cuatro órdenes de magnitud más pequeña. De eso es de lo que trata la gravedad cuántica: información y entropía, densamente empaquetadas.

Hawking quizá haya dado la respuesta falsa a su propia pregunta, pero la pregunta misma era una de las más profundas en la reciente historia de la física. Puede ser que él estuviera cableado de una

forma demasiado clásica —demasiado dispuesto a ver el espacio-tiempo como un lienzo preexistente, aunque flexible, donde se pinta la física— para reconocer las profundas implicaciones de reconciliar la conservación de la información cuántica con la gravitación. Pero la propia pregunta quizá haya abierto el camino para la próxima revolución conceptual importante en física. No muchos físicos pueden presumir de ello.

El legado de Hawking es sin duda muy grande. Otros antes que él sabían que algún día tendría que construirse un puente que salvara el desajuste entre gravedad y teoría cuántica, pero Bekenstein y Hawking fueron los primeros en entrar en un país remoto y volver con oro. Espero que los futuros historiadores de la ciencia digan que ellos lo empezaron todo.

Quien nunca ha fracasado en alguna parte, no puede ser grande.

HERMAN MELVILLE

Física en pocas palabras

Reinan la confusión y la desorientación; causa y efecto se vienen abajo; la certeza se evapora; todas las viejas reglas fallan. Eso es lo que sucede cuando se viene abajo el paradigma dominante.

Pero entonces emergen nuevas pautas. Al principio no tienen sentido, pero son pautas. ¿Qué hacer? Tomar las pautas y clasificarlas, cuantificarlas y codificarlas en nuevas matemáticas, incluso nuevas leyes de la lógica, si es necesario. Reemplazar el

viejo cableado con uno nuevo y familiarizarse con éste. La familiaridad genera respeto, o al menos aceptación.

Muy probablemente somos aún principiantes confundidos con imágenes mentales muy fuertes, y la realidad última permanece mucho más allá de nuestro alcance. El viejo término de los cartógrafos *terra incognita* viene a la mente. Cuanto más descubrimos, menos parecemos saber. Eso es la física en pocas palabras.

Epílogo

En 2002 Stephen Hawking llegó a su sexagésimo aniversario. Nadie pensaba que lo haría, y menos que nadie sus doctores. El acontecimiento merecía una gran celebración, una fiesta de cumpleaños realmente grande, y por eso me encontré una vez más en Cambridge, junto con centenares de personas —físicos, periodistas, estrellas de *rock*, músicos, una imitadora de Marilyn Monroe, bailarinas de cancán— y grandes cantidades de comida, vino y licores. Fue un suceso mediático gigantesco, y estuvo acompañado de una seria conferencia de física. Todo aquel que fue alguien en la vida científica de Stephen dio una charla, incluido el propio Stephen. He aquí un breve extracto de la mía.

Stephen, como todos sabemos, es con mucho la persona más tozuda e irritante en el universo. Creo que mi propia relación científica con él puede ser calificada de conflictiva. Hemos discrepado profundamente sobre cuestiones concernientes a agujeros negros, información y todo ese tipo de cosas. A veces ha hecho que me tirase de los pelos por la frustración... y ustedes pueden ver el resultado. Puedo asegurarles que cuando empezamos a discutir hace más de dos décadas, mi cabeza estaba llena de pelo. En este momento, pude ver a Stephen en la parte trasera del auditorio con su sonrisa malévola. Continué:

Puedo decir también que, de todos los físicos que he conocido, él es quien más ha influido sobre mí y mis ideas. Casi todo en lo que he estado pensando desde 1983 ha sido, de una forma u

otra, en respuesta a su pregunta profundamente perspicaz sobre el destino de la información que cae en un agujero negro. Aunque creo firmemente que su respuesta era equivocada, la pregunta, y su insistencia en una respuesta convincente, nos ha obligado a replantear los fundamentos de la física. El resultado es un paradigma completamente nuevo que ahora está tomando forma. Es para mí un profundo honor estar aquí para celebrar las trascendentales contribuciones de Stephen, y especialmente su magnífica tozudez.

Lo decía de corazón.

Sólo recuerdo otras tres charlas. Dos de ellas eran de Roger Penrose. No recuerdo por qué Roger dio dos charlas, pero lo hizo. En la primera, él argumentó que la información tiene que perderse en la evaporación de un agujero negro. Los argumentos eran los originales que Stephen había elaborado veintiséis años antes, y Roger mantenía que ambos, él y Stephen, seguían creyendo en ellos. Quedé sorprendido, puesto que por lo que a mí me concierne (y a cualquiera que haya seguido los recientes desarrollos), la teoría matriz, el descubrimiento de Maldacena y los cálculos de entropía de Strominger y Vafa han puesto fin a la cuestión.

Pero en su segunda charla, Roger mantuvo que el principio holográfico y el trabajo de Maldacena estaban basados en una serie de equívocos. Dicho simplemente, su argumento era, «¿Cómo iba a ser posible que la física, en más dimensiones, pueda describirse mediante una teoría en menos dimensiones?». Creo que él no había

pensado en ello con suficiente detenimiento. Roger y yo hemos sido amigos durante cuarenta años, y sé que él es un rebelde, siempre en contra del saber estándar. No debería haberme sorprendido que estuviese llevando la contraria.

La otra conferencia que ha calado en mi memoria fue la de Stephen, y no por lo que él dijo, sino por lo que no dijo. Recordó brevemente los hitos de su carrera —cosmología, radiación de Hawking, tiras cómicas excelentes— pero no hizo una sola mención a la pérdida de información. ¿Podría ser que estuviera empezando a dudar? Imagino que sí.

Luego, en una conferencia de prensa en 2004, Hawking anunció que había cambiado de opinión. Sus investigaciones más recientes, decía Stephen, habían resuelto finalmente su propia paradoja: parece que, después de todo, la información escapa de los agujeros negros y finalmente sale en los productos de la evaporación. De algún modo, según Stephen, el mecanismo había sido pasado por alto durante todo este tiempo, pero finalmente él lo había identificado e iba a informar de sus nuevas conclusiones en una próxima conferencia en Dublín. Los medios de comunicación estaban alertados, y había una gran expectación por la conferencia. Los periódicos informaron también sobre que Stephen iba a pagar una apuesta que había hecho con John Preskill (el que me había provocado cierta inquietud en Santa Bárbara con su ingenioso experimento mental). En 1997 John había apostado con Stephen que la información escapaba de los agujeros negros. El pago era una enciclopedia de béisbol.

Muy recientemente supe que en 1980 Don Page había hecho una apuesta similar con Stephen. Como yo sospechaba por la charla de Don en Santa Bárbara, él siempre había sido escéptico respecto a la afirmación de Stephen. El 23 de abril de 2007, dos días antes de que yo escribiera este párrafo, Stephen reconoció formalmente que había perdido. Don tuvo la amabilidad de enviarme una fotocopia del contrato original —una apuesta de una libra británica contra un dólar estadounidense— junto con la concesión firmada de Stephen. La mancha negra al final es la huella del pulgar de Stephen.

¿Hasta qué punto es predecible la gravedad cuántica?

Don Page apuesta con Stephen Hawking una libra esterlina a que es válida la censura cósmica cuántica fuerte, es decir, que un estado inicial puro compuesto enteramente de configuraciones de campo regulares en un hiperespacio completo asintóticamente plano tendrá una evolución única por matriz- S bajo las leyes de la física hasta un estado final puro compuesto enteramente de configuraciones de campo regulares en un hiperespacio completo asintóticamente plano.

Stephen Hawking apuesta con Don Page \$ 1,00 a que en gravedad cuántica la evolución de tal estado inicial puro puede venir dada en general sólo por una matriz- S hasta un estado final mezcla y no siempre por una matriz- S hasta un estado final puro.

«Concedo en vista
de la debilidad de la \$»
Stephen Hawking, 23 de abril de 2007

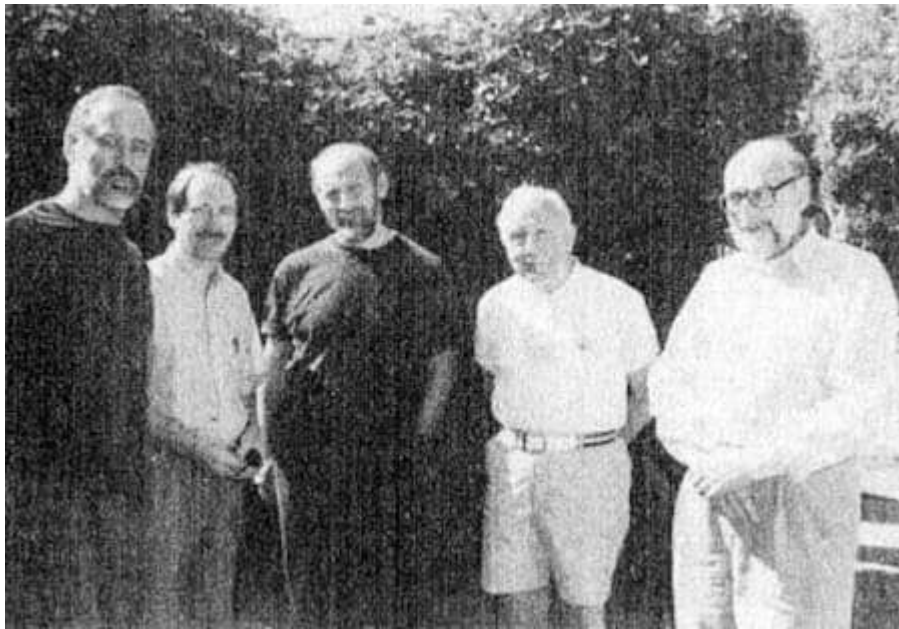


¿Qué pasó en la conferencia de Stephen? No lo sé; no estuve allí. Pero un artículo posterior, escrito varios meses después, daba los detalles. No eran muchos: una breve historia de la paradoja, una descripción farragosa de algunos de los argumentos de Maldacena y una tortuosa explicación final de cómo todo el mundo había tenido razón desde el principio.

Pero no todo el mundo había tenido razón.

Durante los últimos años hemos visto algunos argumentos extraordinariamente polémicos disfrazados de debates científicos, pero en realidad son sólo rencillas políticas. Incluyen disputas sobre el diseño inteligente; sobre si el calentamiento global está ocurriendo realmente, y si es así, si lo provoca el hombre; sobre el valor de los costosos sistemas de defensa mediante misiles; e incluso sobre la teoría de cuerdas. Sin embargo, no todos los debates científicos son polémicos, afortunadamente. Ocasionalmente se manifiestan diferencias de opinión reales sobre cuestiones sustantivas, lo que lleva a nuevas ideas, o incluso cambios de paradigma. La guerra de los agujeros negros es un ejemplo de un debate que nunca fue agrio, aunque implicaba genuinas diferencias de opinión sobre principios científicos en conflicto. Aunque la cuestión de si la información se pierde en los agujeros negros era inicialmente una cuestión de opinión, la opinión científica ha convergido generalmente en torno a un nuevo paradigma. Pero incluso si la guerra original ha terminado, dudo

que hayamos sacado todas las consecuencias de sus importantes lecciones. El cabo suelto más perturbador de la teoría de cuerdas es cómo aplicarla al universo real. El principio holográfico fue confirmado de manera espectacular por la teoría de Maldacena del Espacio anti De Sitter, pero la geometría del universo real no es un Espacio anti De Sitter.



Claudio Teitelboim (Bunster), Gerard 't Hooft, el autor, John Wheeler y François Englert, Valparaíso, 1994

Vivimos en un universo en expansión que, en todo caso, es más parecido a un Espacio De Sitter, con sus horizontes cósmicos y universos de bolsillo burbujeantes. De momento nadie sabe cómo aplicar la teoría de cuerdas, el principio holográfico, u otras lecciones sobre los horizontes de agujeros negros a los horizontes cósmicos, pero es probable que las conexiones sean muy profundas.

Mi conjetura es que estas conexiones están en la raíz de muchos enigmas cosmológicos. Algún día espero escribir otro libro explicando cómo acaba todo esto, pero no creo que sea pronto.



Stephen Hawking y el autor. Valdivia, Chile, 2008

Agradecimientos

Estoy muy agradecido a muchas personas por su ayuda en llevar a término este libro. Mi agente, John Brockman, fue, como siempre, una fuente de sabiduría y buenos consejos. A todas las personas en Little, Brown que trabajaron tan duro —Geoff Shandler, Bárbara Jatkola, Karen Landry y Junie Dahn— me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento.

También estoy en deuda profunda con Stephen Hawking y Gerard 't Hooft por muchos años de amistad, y por la extraordinaria y estimulante experiencia que hizo posible este libro.

Glosario

Agujero mudo: Un agujero de desagüe en donde la velocidad del flujo supera a la velocidad del sonido (en el agua) cerca del desagüe.

Agujero negro: Un objeto tan masivo y denso que nada puede escapar de su gravedad.

Agujero negro extremo: Un agujero negro con carga eléctrica que ha alcanzado su masa mínima para una carga dada.

Antípoda: Pertenece al lado opuesto de la Tierra.

Bit: Unidad básica de información.

Campo eléctrico: El campo de fuerzas que rodea a las cargas eléctricas.

Campo magnético: El campo de fuerzas que rodea a los imanes y las corrientes eléctricas.

Complementariedad de agujero negro: Principio de complementariedad de Bohr aplicado a un agujero negro.

Constante de Newton: La constante numérica, G , en la ley de la fuerza gravitatoria de Newton; $G = 6,7 \times 10^{-11}$ en unidades del sistema métrico.

Constante de Planck: La constante numérica, h , que gobierna los fenómenos cuánticos.

Corpúsculos: Término de Newton para las hipotéticas partículas de luz.

Cromodinámica cuántica: La teoría cuántica de campos que describe a quarks y gluones y cómo forman hadrones.

Cuerda abierta: Una cuerda con dos extremos. Una goma elástica es una cuerda cerrada, pero si se corta con tijeras se convierte en una cuerda abierta.

Cuerda cerrada: Una cuerda sin extremos, similar a una goma elástica.

Cuerdas fundamentales: Las cuerdas que forman los gravitones. Se piensa que el tamaño típico de una cuerda fundamental no es mucho mayor que la longitud de Planck.

Curvatura: La curvatura del espacio o del espacio-tiempo.

D-brana: Una superficie en el espacio-tiempo donde puede terminar una cuerda fundamental.

Determinismo: El principio de la física clásica que dice que el futuro está completamente determinado por el pasado. Socavado por la mecánica cuántica.

Diagrama de inserción: Una representación del espacio-tiempo en un instante de tiempo creada al «seccionar» el continuo espacio-temporal.

Dualidad: La relación entre dos descripciones aparentemente diferentes de un mismo sistema.

Efecto túnel.: Un fenómeno mecano-cuántico en el que una partícula atraviesa una barrera incluso si no tiene energía suficiente para hacerlo clásicamente.

Enana blanca: La fase final de una estrella no mucho más masiva que el Sol.

Entropía: Una medida de la información oculta, a menudo la información almacenada en cosas demasiado pequeñas y demasiado numerosas para seguirles la pista.

Estado fundamental: El estado de un sistema cuántico con la mínima energía posible. A menudo identificado como el estado en el cero absoluto de temperatura.

Espacio anti De Sitter: Un continuo espacio-temporal con curvatura negativa uniforme que se parece a una caja esférica.

Espacio-tiempo: La totalidad del espacio y el tiempo unidos en una sola variedad tetra-dimensional.

Estrella de neutrones: La etapa final de una estrella demasiado grande para formar una enana blanca pero no lo suficientemente grande como para colapsar en un agujero negro.

Estrella oscura: Una estrella tan pesada y tan densa que la luz no puede escapar de ella. Ahora se llama agujero negro.

Física clásica: Física que no tiene en cuenta la mecánica cuántica. Normalmente hace referencia a la física determinista.

Fotones: Cuantos (partículas) de luz indivisibles.

Fuerzas de marea: Fuerzas distorsionantes debidas a variaciones espaciales de la intensidad de la gravedad.

Geodésica: Lo más próximo a una línea recta en un espacio curvo; la trayectoria más corta entre puntos.

Gluébola: Un hadrón compuesto sólo de gluones sin quarks. Las gluébolas son cuerdas cerradas.

Gluones: Las partículas que se combinan para formar las cuerdas que unen los quarks.

Gravedad cuántica: La teoría que unifica la mecánica cuántica con la relatividad general de Einstein: la teoría cuántica de la gravedad. Actualmente es una teoría incompleta.

Grok: Entender algo de una manera profundamente intuitiva, a nivel visceral.

Hadrones: Las partículas íntimamente relacionadas con el núcleo: nucleones, mesones y gluébolos. Los hadrones están formados de quarks y gluones.

Hertzio: Una unidad de frecuencia que mide el número de oscilaciones completas por segundo.

Holograma: Una representación bidimensional de información tridimensional. Un tipo de fotografía a partir de la que puede reproducirse una imagen tridimensional.

Horizonte: La superficie dentro de la cual nada puede escapar de la singularidad de un agujero negro.

Información: Los datos que distinguen un estado de cosas de otro. Se mide en bits.

Interferencia: Un fenómeno ondulatorio en el que las ondas de dos fuentes separadas se cancelan o refuerzan mutuamente en ciertos lugares.

IR: Infrarrojo. A menudo usado para indicar grandes distancias.

Línea de universo: La trayectoria de una partícula en el espacio-tiempo.

Longitud de onda: La distancia ocupada por una longitud de onda completa de cresta a cresta.

Longitud de Planck: La unidad de longitud cuando las tres constantes fundamentales de la Naturaleza — c , h y G — se hacen igual a uno. A menudo se la considera la mínima longitud significativa, 10^{-33} centímetros.

Masa de Planck: La unidad de masa en unidades de Planck; 10^{-8} kilogramos.

Matriz-dólar: Intento de Hawking de reemplazar la matriz-S.

Matriz-S: Una descripción matemática de la colisión entre partículas. La matriz-S es una lista de todas las entradas posibles y las amplitudes de probabilidad para todos los resultados.

Microondas: Ondas electromagnéticas de longitud de onda algo más corta que las ondas de radio.

Movimiento browniano: El movimiento aleatorio de un grano de polen suspendido en agua. La causa es el bombardeo constante de las moléculas de agua que han sido excitadas por el calor.

Movimiento de punto cero: El movimiento residual de un sistema cuántico que nunca puede ser eliminado debido al principio de incertidumbre. También llamado *agitaciones cuánticas*.

Nucleón: Un protón o un neutrón.

Ondas electromagnéticas: Perturbaciones ondulatorias del espacio que consisten en campos eléctrico y magnético vibrantes. La luz es una onda electromagnética.

Ondas de radio: Las ondas electromagnéticas de longitudes de onda más largas.

Oscilador: Cualquier sistema que experimenta vibraciones periódicas.

Primera ley de la termodinámica: La ley de la conservación de la energía.

Principio de equivalencia: Principio de Einstein según el cual la gravedad es indistinguible de la aceleración —por ejemplo en un ascensor.

Principio holográfico: El principio que dice que toda la información está en la frontera de una región del espacio.

Principio de imposibilidad de fotocopia cuántica: Un teorema de la mecánica cuántica que prohíbe la posibilidad de una máquina que pueda copiar perfectamente información cuántica. También llamado principio de imposibilidad de clonación.

Punto de no retorno: Un análogo al horizonte de un agujero negro.

QCD: Cromodinámica cuántica.

Radiación de cuerpo negro: Radiación electromagnética emitida por un cuerpo no reflectante debida a su propio calor.

Radiación de Hawking: Radiación de cuerpo negro emitida por un agujero negro.

Radiación infrarroja: Ondas electromagnéticas de longitud de onda algo mayor que la luz visible.

Radiación ultravioleta: Ondas electromagnéticas de longitud de onda algo más corta que la luz visible.

Radio de Schwarzschild: El radio del horizonte de un agujero negro.

Rayos gamma: Las ondas electromagnéticas más energéticas y de longitud de onda más corta.

Rayos X: Ondas electromagnéticas de longitudes de onda algo más cortas que la radiación ultravioleta pero no tan cortas como los rayos gamma.

RHIC: Colisionador de Iones Pesados Relativistas (Relativistic Heavy Ion Collider). Un acelerador que acelera núcleos pesados a velocidades próximas a la de la luz y los hace colisionar para crear una salpicadura de material nuclear muy caliente.

Segunda ley de la termodinámica: La entropía aumenta siempre.

Simultaneidad: Referente a sucesos que tienen lugar en el mismo instante. Desde la teoría de la relatividad especial, la simultaneidad ya no se considera una propiedad objetiva.

Singularidad: El punto infinitamente denso en el centro de un agujero negro donde las fuerzas de marea se hacen infinitas.

Suceso: Un punto en el espacio-tiempo.

Temperatura: El incremento en la energía de un sistema si se añade un bit de entropía.

Temperatura de Hawking: La temperatura de un agujero negro.

Teoría cuántica de campos: La teoría matemática que unifica las propiedades corpusculares y ondulatorias de la materia. La base de la física de las partículas elementales.

Teoría de cuerdas: Una teoría matemática en la que las partículas elementales se ven como cuerdas microscópicas unidimensionales de energía. Una candidata para la gravedad cuántica.

Teoría de frontera: La teoría matemática de la frontera de una región del espacio que describe todo lo que hay en el interior de dicha región.

Teoría de la relatividad especial: Teoría de Einstein de 1905 que trata de las paradojas de la velocidad de la luz. La teoría dice que el tiempo es la cuarta dimensión.

Teoría de la relatividad general: La teoría de la gravedad de Einstein basada en el espacio-tiempo curvo.

Tiempo de Planck: La unidad de tiempo en unidades de Planck; 10^{-42} segundos.

Tiempo propio: Tiempo transcurrido según un reloj en movimiento; una medida de la distancia a lo largo de una línea de universo.

UV: Ultravioleta. Con frecuencia utilizado para referirse a tamaños muy pequeños.

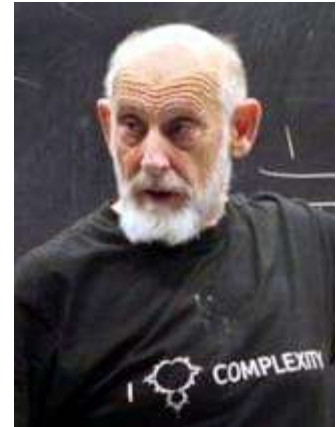
Velocidad de escape: La velocidad mínima con la que un proyectil escapará de la atracción gravitatoria de un objeto masivo.

Velocidad de la luz: La velocidad a la que se mueve la luz, aproximadamente 300 000 kilómetros por segundo; se denota por la letra c .

Viscosidad: Fricción entre las capas de un fluido cuando unas se mueven al lado de otras.

Sobre el autor

LEONARD SUSSKIND nació en Nueva York y actualmente (agosto de 2011) tiene residencia conocida en Palo Alto, California. A la edad de trece años comenzó a trabajar como fontanero. Más tarde se inscribió en el City College of New York (Colegio de la ciudad de Nueva York) como estudiante de ingeniería. Contrajo matrimonio dos veces, la primera en 1960, y ha tenido cuatro hijos. Se diplomó en física en 1962. En el año 1965 y en la Universidad Cornell logró el doctorado en investigación.



ⁱ Juego de palabras intraducible. El término inglés *ham* significa «jamón», pero también se refiere a un histrión; por su parte, el término *baloney* se refiere a la salsa boloñesa pero coloquialmente significa «chorradas, tonterías». (N. del t.)

ⁱⁱ Evel Knievel fue un motorista acrobático que se hizo famoso por sus saltos espectaculares y sus aparatosos accidentes. (N. del t.)

ⁱⁱⁱ La palabra inglesa *bit* significa un pequeño fragmento o una pequeña cantidad. (N. del t.)

^{iv} WASP, literalmente avispa, es también un acrónimo de *White, Anglo-Saxon y Protestant*, la clase dominante de la sociedad norteamericana. (N. del t.)

^v Ayn Rand fue una famosa novelista y pensadora norteamericana de origen ruso, cuya ideología se caracterizaba por un liberalismo extremo tanto en el orden socioeconómico como en el orden moral. (N. del t.)